

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
„КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО“

І. І. Верба, О. В. Даниленко

Проектування обладнання галузевого машинобудування: ЗМАЩУВАННЯ ТА УЩІЛЬНЕННЯ ПІДШИПНИКІВ КОЧЕННЯ

*Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра,
за освітньою програмою „Технології комп'ютерного конструювання верстатів,
роботів та машин“ спеціальності 131 „Прикладна механіка“*

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2020

Рецензенти: *Сохань Сергій Васильович, пров. н. с., д-р техн. наук, ст. н. с.
Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України
Скуратовський Анатолій Кирилович, доцент, канд. техн. наук,
доцент КПП ім. Ігоря Сікорського*

Відповідальний редактор *Струтинський В.Б., професор кафедри конструювання верстатів і
машин КПП ім. Ігоря Сікорського
д-р техн. наук, професор*

Гриф надано Методичною радою КПП ім. Ігоря Сікорського (протокол № 2 від 01.10.2020 р.)
за поданням Вченої ради Механіко-машинобудівного інституту (протокол № 1 від 31.08.2020 р.)

Електронне мережне навчальне видання

*Верба Ірина Іванівна, канд. техн. наук, доцент
Даниленко Олександр Васильович, канд. техн. наук, доцент*

Проектування обладнання галузевого машинобудування: ЗМАЩУВАННЯ ТА УЩІЛЬНЕННЯ ПІДШИПНИКІВ КОЧЕННЯ

Проектування обладнання галузевого машинобудування: Змащування та ущільнення підшипників кочення. [Електронний ресурс]: навч. посіб. для здобувачів ступеня бакалавра, за освітньою програмою „Технології комп’ютерного конструювання верстатів, роботів та машин“ спеціальності 131 „Прикладна механіка“; КПП ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 2,52 Мбайт). – Київ: КПП ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 87 с.

Відомості, наведені в цьому посібнику, є продовженням і доповненням до викладеного в посібнику „Шпindelльні вузли на опорах кочення“. Окрім доцільної конструкції шпindelльного вузла необхідно забезпечити його здатність працювати довгий час без втрати початкових характеристик тому питання змащування та захисту (ущільнення) опор шпindelльних вузлів має не менше значення ніж його конструкція. Навчальний посібник буде корисним для майбутніх конструкторів незалежно від того, в якій машинобудівній галузі вони працюватимуть, чи будуть розроблювати нові механізми, чи експлуатувати чи ремонтувати будь-яке обладнання. Навчальний посібник може бути використаний при вивченні курсів з проектування і конструювання обладнання машинобудування, зокрема, галузевого машинобудування (наприклад, деревообробного та для обробки каменю), обладнання металообробних цехів, промислових роботів, тощо.

Зміст

Вступ	4
1. Способи і засоби змащування опор кочення	6
1.1. Змащування опор кочення: загальні відомості	6
1.2. Змащування рідким мастилом	13
1.2.1. Системи рясного змащування	14
1.2.2. Системи мінімального змащування	19
1.2.3. Системи підведення рідкого мастила	29
1.3. Змащування пластичним мастилом	30
1.4. Змащування твердими матеріалами	35
1.5. Проектування систем змащування	37
1.6. Змащування підшипників ковзання	38
Питання для самоперевірки	40
2. Ущільнення підшипникових вузлів	42
2.1. Функції та типи ущільнень підшипникових вузлів	42
2.2. Безконтактні ущільнення	44
2.3. Контактні ущільнення	64
2.4. Стояночні ущільнення	70
2.5. Комбіновані ущільнюючі пристрої	73
Питання для самоперевірки	80
Додатки	82

ВСТУП

Як основні напрямки конструктивних змін технологічного обладнання галузевого машинобудування, зокрема й металообробного, можна традиційно назвати підвищення продуктивності, яке досягається

- зменшенням часу різання, якщо йде мова про обробне обладнання, тобто мається на увазі інтенсифікація режимів обробки (чи то за рахунок матеріалів, чи то за рахунок конструкцій інструментів, чи створенням спеціальних умов обробки, наприклад, температурних, тощо);
- зменшенням допоміжного часу (зокрема, за рахунок автоматизації роботи безпосередньо самого обладнання)

Звісно, є і інші напрямки розвитку обробного обладнання, які навіть превалюють над продуктивністю (наприклад, гнучкість, бо тенденцією є зменшення серійності та індивідуалізація виробництва, або точність, тощо).

Якщо говорити про інтенсифікацію режимів обробки, то постає питання про якість та параметри підшипникових вузлів: шпиндельного вузла, опор ходових гвинтів, взагалі опор валів, навіть напрямних кочення та гвинтових передач кочення, які по суті підпорядковуються тим самим принципам і вимогам, що й підшипники. Умови експлуатації опор кочення впливають на вибір систем змащування й типу мастила, конструкції або ущільнень, а для контактних ущільнень ще й матеріалу (наприклад, у разі манжетних ущільнень). Вимоги до якості герметизації підшипникових вузлів, в першу чергу шпиндельних, яка забезпечується зокрема ущільнюючим пристроями, весь час зростають у зв'язку з тим, що умови експлуатації, наприклад, тих самих шпиндельних вузлів, стають все важчими з точки зору режимів різання та інтенсифікації підводу мастильно-охолоджуючої рідини у зону різання. Так, тиск мастильно-охолоджуючої рідини досягає 3,5...6 МПа, її витрати – 100..180 л/хв., а швидкість, струменю у ряді випадків перевищує 300 м/с.

Вважаємо, що сказане вище є достатнім обґрунтуванням (звісно, в першому наближенні, без конкретизації) необхідності приділяти достатню увагу питанням змащування та вибору відповідних ущільнень.

Навчальний посібник, присвячений вказаним питанням, є корисним для майбутніх конструкторів незалежно від того, в якій машинобудівній галузі вони працюватимуть, чи будуть розроблювати нові механізми, чи експлуатувати чи ремонтувати будь-яке обладнання.

Навчальний посібник може бути використано при вивченні курсів з проектування і конструювання обладнання машинобудування, зокрема, галузевого машинобудування (наприклад, деревообробного та для обробки каменю), обладнання металообробних цехів, промислових роботів, тощо.

1 СПОСОБИ І ЗАСОБИ ЗМАЩУВАННЯ ОПОР КОЧЕННЯ

1.1 Змащування опор кочення: загальні відомості

Функції мастила:

- забезпечити низьке тертя;
- відвести тепло від поверхонь;
- винести продукти зношення із зони тертя;
- запобігти проникненню сторонніх часток між поверхнями тертя (герметизація підшипників);
- захистити від атмосферної корозії;
- зменшити шум, демпфувати вібрації.

Нестача мастила призводить до проковзування та зношення тіл кочення надмір – до нагріву через інтенсивне перемішування та до втрати мастильних здатностей.

Помилкове змащування є причиною біля 36 % передчасних відмов підшипників, а з врахуванням забруднень – більш за 50 %. Тобто: „Своєчасне застосування мастильного матеріалу потрібної якості у вірно обраній точці змащування і потрібним способом“.



Рис. 1. Причини виходу з ладу підшипників кочення (за даними фірми SKF, [6])

Вірно обрана програма змащування за рахунок зменшення тертя завжди зумовить зниження енергоспоживання, тепловиділення, зношення, шуму, а також зменшить час простоїв, експлуатаційні витрати, зокрема на технічне обслуговування й ремонт, забруднення продукції, споживання мастила, корозію. Одночасно зросте продуктивність, надійність, довговічність, безпечність експлуатації.

Напрямок розвитку мастильних пристроїв: від ручного змащування до автоматизованого, від принципу „чим більше, тим краще“ до точного дозування при періодичній подачі, від безконтрольної подачі до контрольованої, зокрема із зворотним зв'язком від пар тертя (підтримується режим змащування залежно від режиму роботи й стану пар тертя).

На рис. 2 показано автоматичний лубрикатор фірми SKF (в даному випадку для пластичного мастила).



Рис. 2 Автоматичний багатоточковий лубрикатор SKF серії TLMP [6]

Пропонується програмне забезпечення для вибору марки мастила, розрахунку інтервалів між змащуваннями, планування змащування. Питанням управління змащуванням сьогодні приділяється значна увага.

Довідка

- Для подачі мастила використовують певні сили:
- сила ваги (подача самотливом, капілярне змащування, тощо);
- капілярний тиск (за допомогою гнотів, пористих втулок, повстяних вставок, тощо);
- сила в'язкого тертя мастила і рухомої поверхні (масляна ванна, за допомогою фрикційних насосів і т. ін.);

- тиск мастила на вільну поверхню (використання маслянок);
- відцентрова сила та сила швидкісного напору (подача гвинтовими пристроями, обертовими конусними насадками, тощо);
- перепад тиску, який створюється зовнішнім насосом або самим механізмом, що його змащують;
- сила інерції мастила (змащування розпорошуванням або розбризкуванням).

У ШВ використовують:

- рідкі мастила;
- пластичні(консистентні) мастила;
- тверді мастила.

Коли обирають вид мастила, то враховують:

1. габарити підшипника та частоту його обертання.

При обводових швидкостях до 4...5 м/с можна використовувати як рідкі, так і консистентні мастила. Для високих швидкостей найчастіше застосовують рідкі мастила. Чим вища обводова швидкість, тим меншою повинна бути в'язкість рідкого мастила та консистентність консистентного.

2. навантаження на підшипник.

Чим вище навантаження на підшипник, тим більшу консистентність (в'язкість) повинні мати мастила, бо це гарантує сталість мастильної плівки.

3. робочу температуру вузла.

Для підшипників, що працюють при 70-80°C, треба застосовувати рідкі мастила найбільшої в'язкості.

4. стан зовнішнього середовища.

У забрудненому середовищі краще використовувати консистентні мастила.

Найбільш поширені – рідкі мастила. Переваги:

- добре відводять тепло;
- є стабільними за властивостями, можуть працювати при високих температурах (тобто і високих швидкостях);
- виносять продукти зношення з підшипників;
- забезпечують можливість заміни мастила у вузлі без демонтажу експлуатація;

- Дозволяють використовувати фільтрацію та проточні системи змащування.

Недолік – можливість витікання з корпусів, через що:

- ускладнюються ущільнення;
- збільшуються витрати мастила.

Зараз переважно використовують мінеральні парафінові масла, але вони гірше за інші масла функціонують при низьких температурах (через кристалізацію) і потребують зменшення частки парафіну. Взагалі за температури вище 90°C мінеральні масла швидко окислюються, тож застосовують синтетичні масла.

Основний технічний показник мастила – його в'язкість: визначає експлуатаційні властивості ШВ (зумовлює здатність мастила зменшувати тертя та зношення, а також характеризує рухливість мастила).

В'язкість мастила обирають за:

- частотою обертання ШВ;
- навантаженням на опори;
- температурою ШВ (з точки зору тепловідведення та впливу нагріву на мастильні здатності).

В'язкість масла залежить від температури. В'язкість вимірюють при температурі 50°C або 100°C. Класи в'язкості ISO визначають при 40°C.

Чим вища в'язкість, тим більше навантаження на розрив може витримати плівка мастила, але й тим більше опирається мастило рухові деталей, викликає зростання температури та підвищення витрат енергії, погіршується теплообмін між мастилом та підшипником.

Для швидкохідних підшипників треба використовувати малов'язкі мастила, а для підшипників, що працюють під великими навантаженнями за невеликих частот обертання – середньов'язкі мастила та високов'язкі. Враховуючи змінювання в'язкості в залежності від температури, слід при підвищених робочих температурах використовувати високов'язкі мастила. Але збільшення в'язкості масла в свою чергу зумовлює підвищення температури, тому покращувати умови змащування підшипників за рахунок в'язкості масла можна обмежено.

Для підбору потрібної в'язкості мастила використовують номограми (наприклад, [15, 17]). Там же наведені основні технічні показники мінеральних мастил, що найчастіше використовують для підшипників кочення

В залежності від здатності відводити тепло розрізняють:

- рясне змащування – з відведенням тепла (циркуляційне, впорскуванням, поливом струменем мастила);
- мінімальне змащування – без відведення тепла (крапельне, гнотове, масляним туманом, масло-повітряне та імпульсне).

Йдеться про кількість мастила на доріжках кочення, яке проходить через підшипник кочення. При мінімальному змащуванні у внутрішній порожнині підшипника знаходиться мінімальний об'єм мастила, достатній лише для відокремлення робочих поверхонь еластогідродинамічною плівкою (шар $h=0,25\text{мкм}$). Тобто у цьому випадку зменшуються витрати на тертя і, відповідно, тепловиділення. На тепловиділення також впливає те, що мастило подають охолодженим. Проблема: подане мастило повинно потрапити на поверхні тертя.

Засіб змащування рідким мастилом обирають, враховуючи:

- потрібну швидкохідність ШВ;
- положення ШВ у просторі (горизонтальне, вертикальне, нахилене);
- умови підводу мастила;
- конструкцію ущільнень.

Пластичне мастило має певні переваги:

- значно спрощуються конструкції ущільнень;
- самі системи змащування конструктивно простіші, що зменшує трудомісткість обслуговування й ремонту;
- здатність витримувати значніші навантаження;
- ефективніше поглинає шум та демпфірує вібрації;
- краще герметизується точка змащування;
- у легко навантажених та швидкохідних ШВ забезпечує найменші витрати на тертя.

Застосовують у випадках, коли:

- спеціальне охолодження опор не потрібне, наприклад, для упорно-радіальних підшипників з кутом контакту $\alpha = 12...18^\circ$;
- підшипники важкодоступні;
- підшипники працюють у забрудненому середовищі;
- підшипники виконані з одноразовим змащуванням на весь строк експлуатації.

У легконавантажених та швидкохідних ШВ найменші витрати на тертя – при консистентному змащуванні. Але якщо є потреба у відведенні тепла або необхідно досягти дуже високих швидкостей, то застосовують рідке мастило. Умовою є наявність плівки мастила, яка повністю відокремлює тіла кочення та доріжки кілець підшипників. Гідродинамічна товщина плівки становить $h_m = 0,25$ мкм.

Змащування твердими матеріалами (підшипники із самозмащуванням) використовують, коли непридатні рідкі та пластичні мастила, наприклад, з конструктивних міркувань.

Тверді мастильні матеріали – це композиції на основі графіту, фторопласту, дисульфиду молібдену, тонкий шар м'яких металів (нікель, срібло тощо). Вони зменшують тертя та зношення без гідродинамічного ефекту.

Таблиця 1.1

Загальна характеристика способів змащування рідким мастилом

Змащування доріжок кочення	Спосіб подачі мастила	Найвища швидкохідність $dn_{max} \times 10^5$, мм/хв	Інтенсивність тепловідведення мастилом	Використовувана апаратура	Витрати на системне змащування	Область використання у верстатах
Рясне	Циркуляційне (проточне)	5,0	Помірна	Стандартні насоси	Помірні	Широко у верстатах з коробками швидкостей, верстатах з ручним керуванням
	Впорскування (під тиском) з охолодженням мастила	18,0	Велика	Спеціальні насоси для впорскування та відсмоктування	Великі	Верстати надшвидкісного різання; важкі і прецизійні верстати, що потребують максимально можливого тепловідведення

Верба І.І., Даниленко О.В.
Змащування та ущільнення підшипників кочення

Мінімальне	Крапельне, розбризкуванням	1,5	Відсутня	Крапельні дозатори - маслянка	Малі	Найпростіші верстати нормальної точності, зокрема – заточувальні
	Масляний туман	10,0	Слабка	Обладнання для утворення масляного туману	Помірні	В першу чергу – внутрішньо-шліфувальні верстати. Умова – ретельна ізоляція робочої зони, вентиляційна витяжка
	Масло-повітряне	12,0	Слабка	Обладнання масло-повітряного змащування	Помірні	Верстати з ЧПК, токарні, фрезерні типа “обробний центр” для швидкісної обробки
	Пластичне	7,0, можливо до 10,0 – у радіально-упорних підшипниках	Відсутня	Не потрібна	Відсутні	Всі види верстатів, особливо при вертикальних ШВ, у верстатах з ЧПК, підшипниках з одноразовим змащуванням
	Тверде	0,5 $n_{\text{гран}}$ підшипника	Відсутня	Не потрібна	Відсутні	Навантаження обмежені контактними напруженнями на поверхнях контакту

Тип мастильного матеріалу зумовлює конструкцію підшипника, але в будь-якому разі має вплив на швидкохідність та вантажопідйомність.

В залежності від типу системи змащування один і той же ШВ може працювати з різною граничною частотою обертання.

В таблицях 1.2, 1.3, 1.4 подано інформацію про зв'язок типу системи змащування й швидкохідність підшипників.

Таблиця 1.2

Тип системи змащування	Коефіцієнт збільшення K_v
Пластичне	1
Крапельне	1-1,1

Рідке циркуляційне рясне	1,3-1,4
Масло-повітряне (мікродозоване)	1,3
Масляним туманом	1,3-1,5
Впорскуванням рідкого мастила у підшипник (під тиском)	1,6-2
Твердим пластичним матеріалом	0,5

Таблиця 1.3 [6]

Метод змащування	$d \cdot n \times 10^5$, мм·хв ⁻¹
Зануренням у мастильну ванну	1,0
Циркуляційне	4,0
Інтенсивне циркуляційне	7,5
Пластичне змащування	3,0
Крапельне	5,0
Масляний туман	10,0
Впорскуванням	13,0

1.2 Змащування рідким мастилом

При виборі способу змащування рідким мастилом враховують потрібну швидкохідність ШВ та швидкохідність, що може бути забезпечена (табл. 1.4):

Таблиця 1.4

Параметр граничної швидкохідності вузлів для різних систем змащування

Тип опор шпинделя	Метод змащування	Параметр граничної швидкохідності $dn_{\max} \times 10^5$ мм·хв ⁻¹
Радіально-упорні шариопідшипники з кутом контакту 12...18°	Масляний туман Повітряно-мастильне Мінімальне імпульсне рідке впорскуванням охолодженого мастила (особливо при установці по одному підшипнику в опорі)	$(8...10) \cdot 10^5$ $(8...10) \cdot 10^5$ $(8...10) \cdot 10^5$ $(10...20) \cdot 10^5$
Всі інші види опор	Циркуляційне змащування (без охолодження маститла) Масляний туман Повітряно-мастильне Мінімальне імпульсне рідке Змащування впорскуванням без охолодження мастила	$(2...2,5) \cdot 10^5$ $(3...5) \cdot 10^5$ $(3...5) \cdot 10^5$ $(3...5) \cdot 10^5$ $(5...6) \cdot 10^5$

1.2.1 Системи рясного змащування

Зараз переважно використовують мінеральні парафінові масла, але вони гірше за інші масла функціонують при низьких температурах (через кристалізацію) і потребують зменшення часки парафіну. Взагалі за температури вище 90°C мінеральні масла швидко окислюються, тож застосовують синтетичні масла.

В'язкість масла залежить від температури. Обирають масла із меншим індексом в'язкості (VI) – тобто з меншою залежністю від температури): VI 85 та вище. Збільшення в'язкості масла зумовлює підвищення температури, тому покращувати умови змащування підшипників за рахунок в'язкості масла можна обмежено.

Класи в'язкості ISO визначають при 40°C

Довідка

Найрозповсюдженіші присадки до рідких мастил (за даними фірми SKF, [17]):

- *антиокислювальні – підвищують більш ніж в 10 разів опір старінню масла (при окислюванні виникають хімічні з'єднання, що підвищують в'язкість масла і можуть викликати корозію);*
- *антипінні – зменшують наслідки утворення піни, яка знижує ефективність змащування;*
- *антикорозійні (які є розчинними у воді або маслі);*
- *антизношувальні – обмежують інтенсивність зношення в разі появи безпосереднього металевого контакту за рахунок утворення плівки (мають загальне позначення AW (Anti Wear);*
- *поляризуючої дії (молекули певних речовин орієнтуються перпендикулярно до металевої поверхні і зменшують тертя при температурах до 100 °C).*
- *антизадирні (EP) містять з'єднання фосфору, хлору і сірки (треба обережно обирати, враховувати умови експлуатації підшипників та склад присадки).*
- *тверді мастильні добавки (дісульфід молібдену і графіт, розмір часток не більше і не менше 0,2 мкм.)*

Циркуляційне змащування (проточне) здійснюється автономною системою, яка призначена окремо для шпиндельних вузлів або є спільною для шпиндельного вузла та коробки швидкостей. Головною перевагою циркуляційного змащування є відведення тепла від підшипника, що дає можливість стабілізувати температуру опор ШВ, тобто підвищити точність обробки за рахунок зниження температурних деформацій.

Мастило під тиском подають безперервно у шпиндельну опору (рис 1.3, а) або в карман, з якого воно стікає до опори (рис 1.3, б). Головна перевага – відведення тепла, тобто підвищення точності ШВ за рахунок стабілізації температури опор і зменшення температурних деформацій.

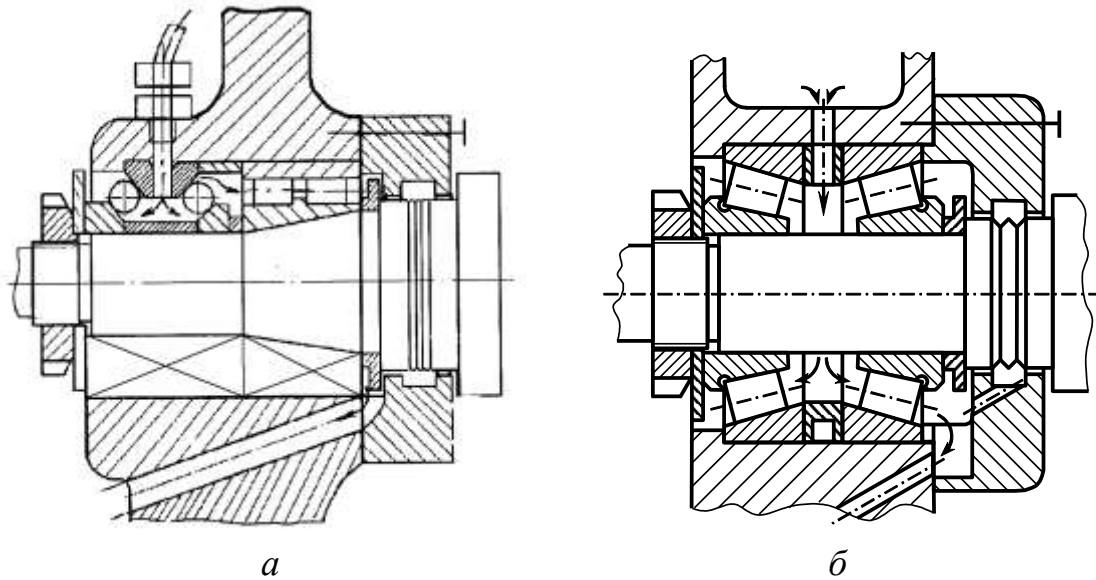


Рис. 3 Схеми способів підведення мастила в опори ШВ при циркуляційному змащуванні.

Найзручніша система у разі одночасного змащування групи підшипників.

Рекомендації:

- Для поліпшення циркуляції передбачають отвори у зовнішньому кільці підшипника, у сепараторі, роликах, тощо.
- Мастило підводять у зону всмоктування: до меншого діаметра доріжок кочення радіально-упорних шарикових та роликових підшипників, яким притаманний насосний ефект. Якщо два підшипники встановлені поряд за схемою «О», то доцільно вводити мастило між ними (див. рис. 6, б).
- У вертикальному ШВ мастило підводять до верхнього підшипника.
- Періодичність заміни масла при циркуляційному змащуванні визначається контролем його якості.
- Передбачають вільний злив мастила (канал підведення у 3-5 разів перевищує за площею вхідний отвір). Наприклад, подавати мастило струменем у зазор між сепаратором та внутрішнім кільцем підшипника (якщо сепаратор центровано

по зовнішньому кільцю або по тілах кочення) чи між сепаратор та зовнішнім кільцем (якщо сепаратор центровано по внутрішньому діаметру) через форсунки – отвори діаметром 0,5...2,5мм.

При змащуванні швидкохідних та важконавантажених підшипників, які працюють в умовах значного тепловиділення, бажано на кожен підшипник скеровувати кілька струменів (безпосередньо до сепаратора). Використовують кілька форсунок. До того ж це зменшує небезпеку повного перекриття подачі мастила в разі забруднення форсунки та забезпечує рівномірне охолодження підшипника. Форсунки розташовують з одного боку у верхній частині корпусу. Канал відведення (у 3...5 разів більший за площу, ніж вхідний отвір) розташовують з іншого боку та знизу. Струмінь мастила повинен “пробити” підшипник, який обертається, тож швидкісний напір повинен бути чималим (рис. 4).

Мастило охолоджують у резервуарі або з використанням холодильника.

Кількість мастила, яке подають в опору, та мінімально припустиму його кількість розраховують [8, 13]. Наприклад, для радіально-упорних підшипників з внутрішнім діаметром $d > 120\text{мм}$ це 2,5 л/хв. Орієнтовно кількість рідкого мастила, яке подають в опору, можна визначити за залежністю [13] $Q = 0,00005 \cdot d n$, л/хв., де d – діаметр отвору підшипника. Розраховують також мінімально припустиму витрата мастила для змащування шпиндельних опор [8].

Із зростанням частоти обертання шпинделя $n_{\text{шп}}$ інтенсивність тепловиділення зростає (приблизно пропорційно $n_{\text{шп}}^2$) і випереджає інтенсивність тепловідведення, зростає опір прокачуванню мастила. Перемішування занадто великого об’єму мастила зумовлює підвищення температури замість зниження. За високих частот обертання прокачати через підшипник необхідний об’єм мастила неможливо.

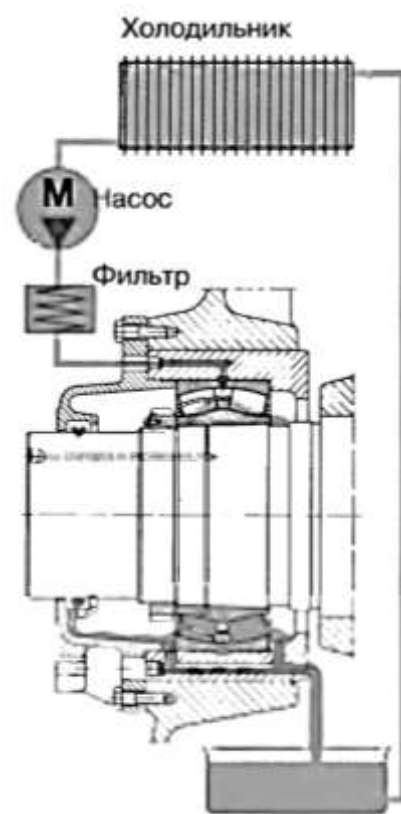


Рис. 4 Система циркуляційного змащування (SKF, [17])

Змащування впорскуванням здійснюється для підшипників, частота обертання яких близька до граничної. Підведення мастила забезпечується через сопла, розташовані по колу, чи спеціальною системою. Через 3-4 отвори у кільці підшипника або через канали у проставочному кільці (рис. 5) та зазори між сепаратором та внутрішнім кільцем підшипника мастило під тиском 0,4 МПа потрапляє на його робочі поверхні. Витрати мастила більші, ніж при циркуляційному змащуванні (при $d > 120$ мм до 4 л/хв), а температура опори – нижча. Мастило видаляється самопливом або за допомогою насоса.

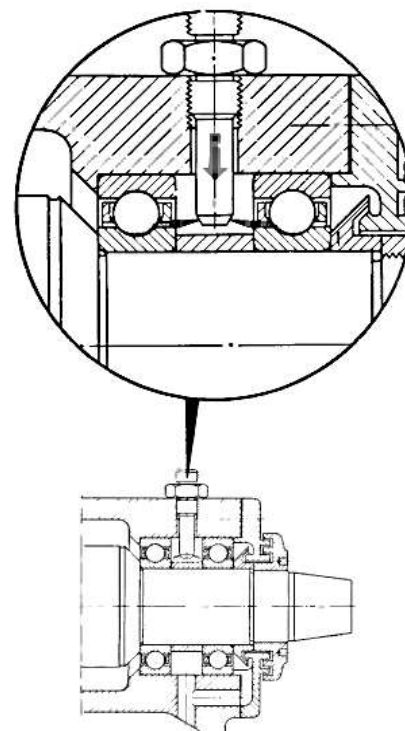


Рис. 5 Змащування впорскуванням [17]

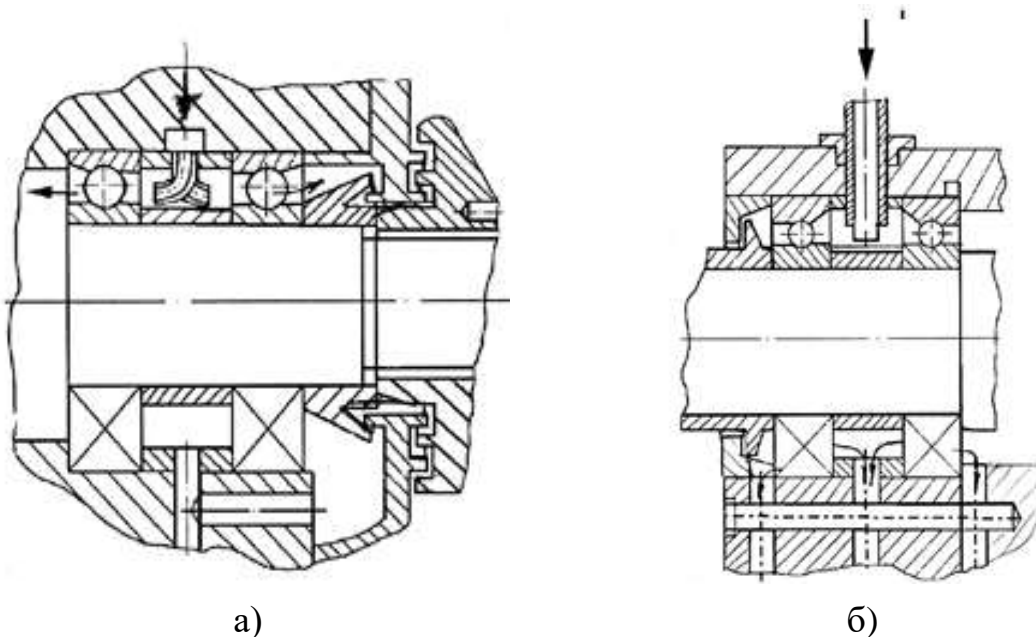


Рис. 6 Змащування впорскуванням:
а) через спеціальні канали-трубки; б) через форсунки.

На рис. 7 зображена підшипникова опора з спеціальним проставочним кільцем для впорскування. Мастило вводиться у проставочне кільце, а далі проходить через кілька дюз 3, які розташовані у кільці по колу таким чином, що отвори дюз співпадають із зазором між сепаратором та внутрішнім кільцем підшипника. Дюзи 3 з'єднані між

собою кільцевим пазом 2. Через заглибини 4 у кільці 1 відбувається злив мастила. Щоб мастило не застоювалось, його зливають з обох боків підшипника.

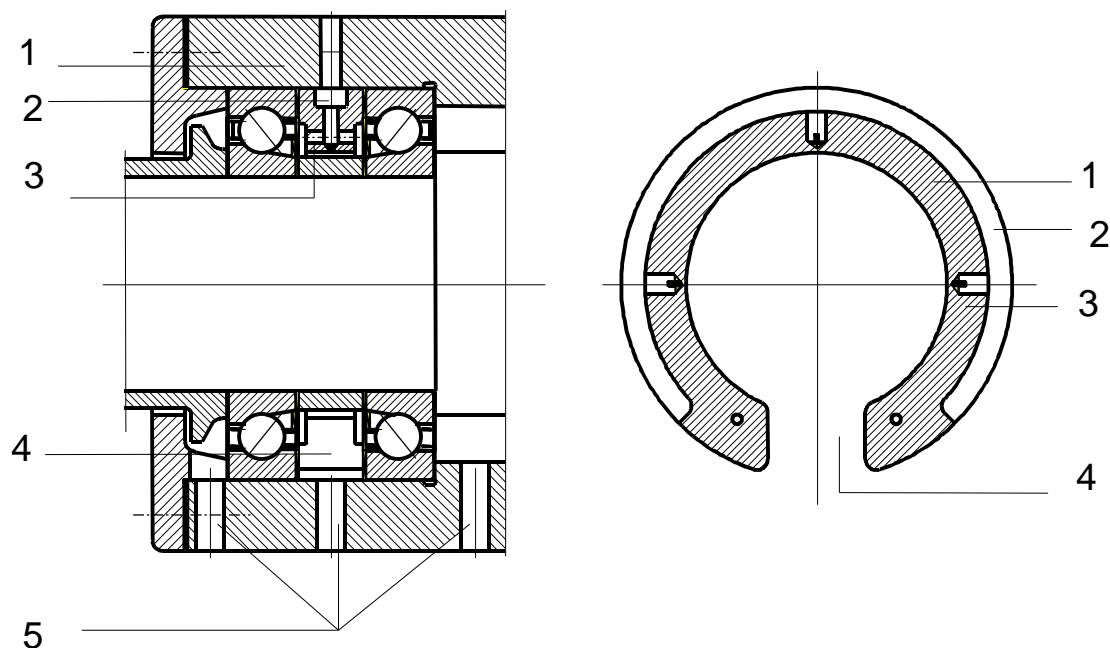


Рис. 7 Змащування впорскуванням через отвори у спеціальному проставочному кільці

Частота впорскування мастила встановлюється електромагнітним дозатором. Швидкість струменя повинна становити не менше, ніж 15м/с (до 30м/с), бо скерований струмінь повинен здолати повітряний потік, що обертається у зазорі між сепаратором та кільцем. Якщо насосний ефект перешкоджає проходженню мастила, треба збільшити швидкість струменя, тобто можливе встановлення підшипників за схемою “Х” (рис.7). Цей варіант змащування придатний для високих та надвисоких частот обертання, а застосування змащування впорскуванням зумовлюється саме прагненням високих швидкостей. Особливо доцільно використовувати таке змащування при потребі у відведенні тепла, яке утворюється у підшипнику.

Тільки змащування впорскуванням забезпечує у ШВ швидкохідність $K_v=(15...17) \cdot 10^5$ мм/хв. та стабілізацію робочої температури на рівні 20°C над температурою довкілля. Це кращі показники, ніж при використанні масляного туману.

Складною проблемою є видалення мастила та герметизація передньої порожнини ШВ, яка межує з технологічною зоною. Треба враховувати дві суперечливі вимоги: 1) для видалення мастила самопливом необхідні довгі горизонтальні канали великого

діаметру (мінімальний діаметр (мм) зливних отворів для змащування мастилом певної в'язкості розраховують); 2) для забезпечення мінімальної відстані від осі шпинделя до робочої поверхні столу верстата слід зменшувати діаметр корпусу ШВ, що виступає уперед. Надійне видалення мастила через канали малого діаметру забезпечується примусовою відкачкою його насосом, але це збільшує витрати енергії та вартість ШВ, до того ж великі витрати мастила потребують ущільнень високої вартості.

Охолоджується мастило відстоюванням у баці для зливу, об'єм якого в разі відсутності примусового охолодження також розраховують (вважається, що об'єм баку не повинен бути меншим за 3 літри).

Для збільшення частот обертання використовують конструкції ШВ, в яких підшипники кочення змонтовано у гідростатичних "плаваючих" стаканах.

1.2.2 Системи мінімального змащування

У таких системах в робочу зону підшипника тим чи іншим чином вводять точно дозований мінімальний об'єм мастила, достатній лише для відокремлення робочих поверхонь еластогідродинамічною плівкою.

Певні труднощі пов'язані з тим, що невелика кількість мастила, яке поступає у підшипник, повинна потрапити на поверхні тертя й кочення, а не залишатися на неробочих ділянках підшипника.

Мінімальне змащування застосовують для високошвидкісних ШВ. При цьому в'язкість мастила не повинна бути дуже низькою (себе виправдали мастила з номінальною в'язкістю 20...30 мм²/с при 50°C).

При збільшенні кількості масла збільшується тертя і, відповідно, зростає температура. Але якщо кількість масла ще більше зростає, то починається режим охолоджуючого змащування (рис. 8), температура підшипника знижується. Зону між мінімальним та охолоджуючим змащуванням слід по можливості уникати [10]

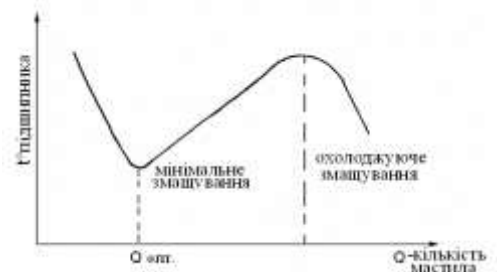


Рис. 8 Залежність температури підшипника від кількості мастила в опорі [10]

Наприклад, за номінального діаметру отвору підшипника від 50 мм до 120 мм мінімальне змащування становить 0,002...0,005 л³/год, охолоджуюче змащування – 1,1...4,2 л/хв.

Товщина мастильної плівки характеризується параметром режиму змащування:

$$\lambda = \frac{h}{R_a},$$

де h – товщина плівки; $R_a = \sqrt{R_{a1}^2 + R_{a2}^2}$ – зведене середнє квадратичне значення висоти мікронерівностей; R_{a1} , R_{a2} – середньоквадратичні значення висоти мікронерівностей поверхонь, які контактують.

Для еластогідродинамічного змащування $\lambda \geq 3$. Такий режим характерний для підшипників, які працюють у широкому діапазоні швидкостей та температур. При проектуванні опор кочення доцільно забезпечити $3 < \lambda < 5$.

Довідка

Гідродинамічне змащування ($\lambda \geq 10$) спостерігається і у високошвидкісних малонавантажених (контактні напруження до 150...300 МПа) опорах. Недоліком цього режиму є гідравлічний опір в опорі.

Параметр λ перевіряють за формулою [10]:

$$\lambda = K_\lambda \cdot d_m \cdot \Psi^{0,73} \cdot n \cdot P_0^{-0,09},$$

де Ψ – коефіцієнт, що залежить від в'язкості мастила [10]; K_λ – коефіцієнт, який визначається типом підшипника (наприклад, $K_\lambda = 2400$ – для радіально-упорних шарикопідшипників), $d_m = 0,5(D_{зовн} + d_{внутр})$, – середній діаметр підшипника, мм; P_0 – еквівалентне статичне навантаження, Н; n – частота обертання, хв⁻¹.

Крапельна система забезпечує подачу у підшипник невеликої кількості мастила (0,02...2 мл/хв 0,02-2)10⁻³ л/хв), або 1-100 г/год) – кілька десятків крапель на годину. У сучасних верстатах використовують індивідуальні дозатори (імпульсні) з індивідуальним регулюванням витрат. Витрати на тертя порівняно з циркуляційним змащуванням зменшуються у 6-8 разів, порівняно з пластичним

збільшуються втрати на тертя на 10-15%. Обмеження у застосуванні: потреба в надійній системі довготривалій подачі мастила малими дозами.

Гнотова система: ґрунтується на використанні капілярних властивостей фетрового або вовняного гноту, який додатково ще й очищує мастило. Точне дозування неможливе, є небезпека накопичування мастила в опорі, забруднення й зношування гнотів.

Змащування розпорошенням мастилом: передбачає подачу під тиском 0,2...0,6 МПа струменем охолодженого повітря розпорошених часток мастила. Є ефективним для високошвидкісних мало навантажених опор горизонтальних та вертикальних валів.

Характерно:

- Створюється постійно оновлювана плівка при конденсації мастила на поверхнях тертя;
- Забезпечується охолодження стисненням повітрям;
- Створюється захист від пилу та забруднень завдяки надлишковому тиску в опорі – перешкоджає прониканню абразиву та МОР через ущільнення;

Існують дві основні системи змащування:

- масляним туманом;
- повітряно-мастильне.

Загальна назва системи повітряно-мастильного змащування – система «oil+air».

Змащування масляним туманом передбачає:

- використання суміші часток мастила розміром 1-2 мкм з охолодженням повітрям, вміст мастила у суміші не перевищує 5-12%;
- подачу через сопла мінімально необхідної дозованої кількості мастила (50-120 крапель розпорошеного мастила за хвилину);
- забезпечення швидкості мастила на виході з сопла 30...50 м/с. Сопло встановлюють, запресовують у корпус з врахуванням насосного ефекту на відстані 3...25 мм.

Недоліки:

- складна система підготовки повітря та розпорошування мастила (рис. 9);
- забруднення навколишнього середовища – повітря виходить назовні через ущільнення разом з частинками мастила.

Повітря (або будь-який газ, що є нейтральним до мастила та змащуваних деталей, а також не шкідливий для персоналу) під тиском 0,2...0,6 МПа подається з мережі через електропневматичний клапан 1 (типу 3В66-52), реле

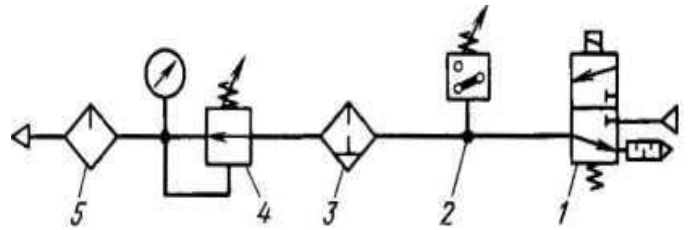


Рис. 9 Схема змащування масляним туманом [18]

тиску 2, очищується від води у вологовідділювачі 3 (типу В41-13), регулятором 4 (типу БВ-57-13) тиск зменшують до 0,18-0,2 МПа і повітря надходить у маслорозподільник 5 (типу В44-23), який подає 80-100 краплин масла у хвилину. У маслорозподільнику повітря насичується парами масла та надходить трубопроводом до штуцера, потім – у зону підшипників. Для створення мастильного туману використовують масло типу «велосит».

Довідка [<https://ukrspecservise.com.ua/masla/industrialnye/velosit/>]

Велосит – це мінеральне нафтове масло високого очищення з поліпшеними антиокислювальними, протизношувальними, антикорозійними властивостями, яке має малу в'язкість. Його застосовують для змащення високошвидкісних малонавантажених механізмів, високошвидкісних середньо навантажених шпиндельних вузлів, токарного та фрезерного верстатного обладнання з підшипниками ковзання і кочення, деревообробних верстатів а також прядильних веретен і крутильних верстатів, інших елементів промислового обладнання.

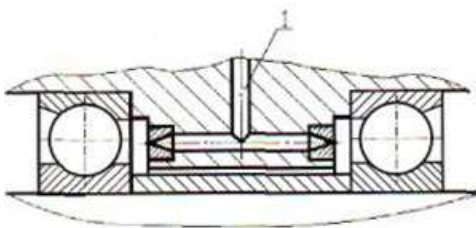


Рис. 10 Змащування масляним туманом радіально-упорних підшипників

Крім того, Велосит використовують в циркуляційних системах, які розраховані на роботу з маслами малої в'язкості.

Залежно від в'язкості Велосит поділяють на: Велосит 2, Велосит 3, Велосит 5, Велосит 7, Велосит 10, Велосит 15 (у порядку збільшення кінематичної в'язкості при 40 ° – від 2,3 до 15 мм²/с).

Для подачі розпорошеного мастила використовують втулки-сопла, які запресовують у корпус (рис. 10). По центральному каналу 1 подають розпорошене мастило, яке через окремі сопла потрапляє до кожного з підшипників. Відведення мастила здійснюється

через дренажні отвори, які розташовані у нижній частині вузла. Прохідний переріз дренажних отворів, як мінімум, у 2 рази більший, ніж отвір сопла. Конструкція, розміри, форма сопел визначаються кількістю мастила, умовами експлуатації та конструкцією опори.

Ефективність змащування залежить від ступеню конденсації мастила на поверхнях тертя, тобто визначається кінетичною енергією часточок мастила у трубопроводах та насадках-соплах, які збільшують швидкість мастильно-повітряного струменю. Наприклад, пряме сопло при тискові 0,05 МПа конденсує до 75% мастила. Такі сопла використовують для змащування закритих підшипників кочення з великою частотою обертання. Додаткова конденсація (10...24)% мастила забезпечується завдяки використанню вихрового потоку, що створюється обертанням підшипника.

Швидкість мастила на виході з сопла становить 30...50 м/с. Встановлюють сопло на відстані 3...25 мм, щоб сконденсоване мастило втягувалося у зону тертя (тобто розташовують з боку меншого діаметру конічних роликів та радіально-упорних шарикових підшипників – використовують насосний ефект).

Для підвищення ефективності змащування та охолодження збільшують кількість сопел, а не переріз отвору. Коли суміш потрапляє на поверхню підшипника, туман конденсується, мастило утворює у зоні тертя постійно поновлювану плівку. Повітря виводиться через щілинні ущільнення чи дренажні канали (при цьому назовні проникають часточки мастила й погіршують санітарні умови).

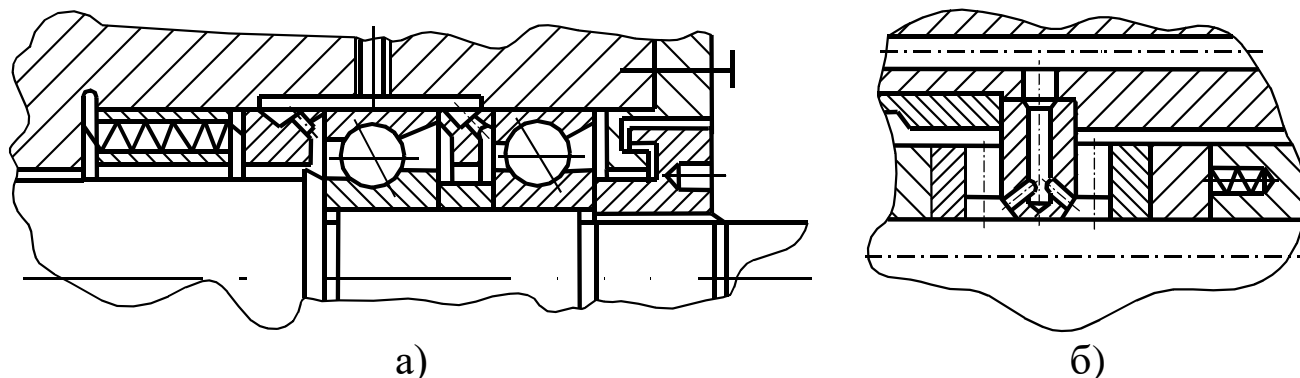


Рис. 11 Змащування масляним туманом:

а – радіально-упорних підшипників; б – упорних роликів підшипників

Для змащування відкритих високошвидкісних підшипників ($V \sim 600$ м/хв.) використовують сопла „примусового живлення“: додатково до потоку, утвореного повітряно-мастильною сумішшю подають ~ 8 л/хв. повітря під тиском 0,07 МПа.

Область використання: переважно для ШВ верстатів, що працюють абразивним інструментом: тиском повітря забезпечується захист підшипника від абразивного пилу (рис. 12).

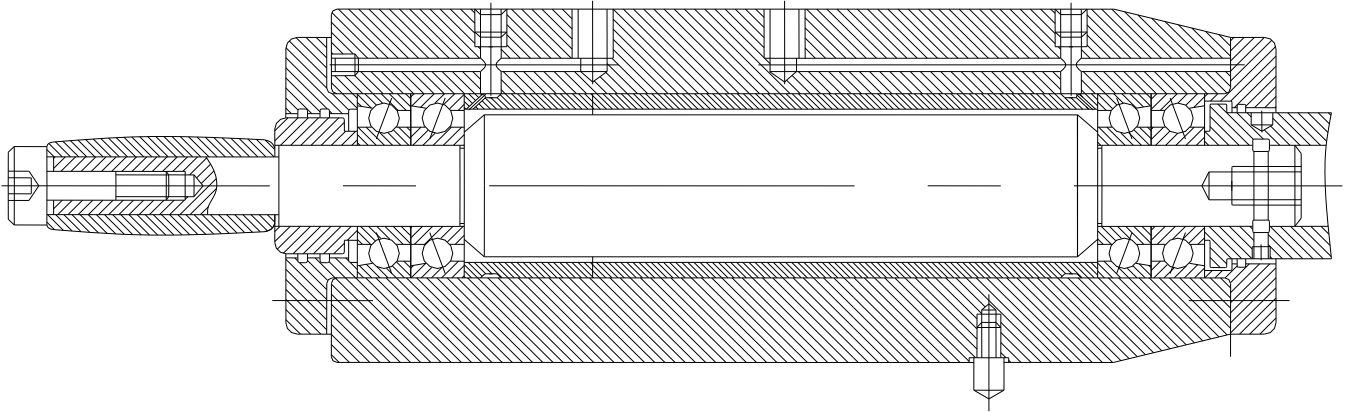


Рис. 12 Шліфувальний шпиндель із змащенням масляним туманом

Потужність привода 2.2 кВт; максимальна частота обертання $n=28000 \text{ хв}^{-1}$, у передній та задніх опорах встановлені радіально-упорні підшипники FAG B7204C.TPA.NG.UL (ГПЗ-2-436204К) за схемою тандем.

Змащування масляним туманом застосовують і для шпиндельних вузлів середніх розмірів, а також – для ШВ важких верстатів (рис. 13)

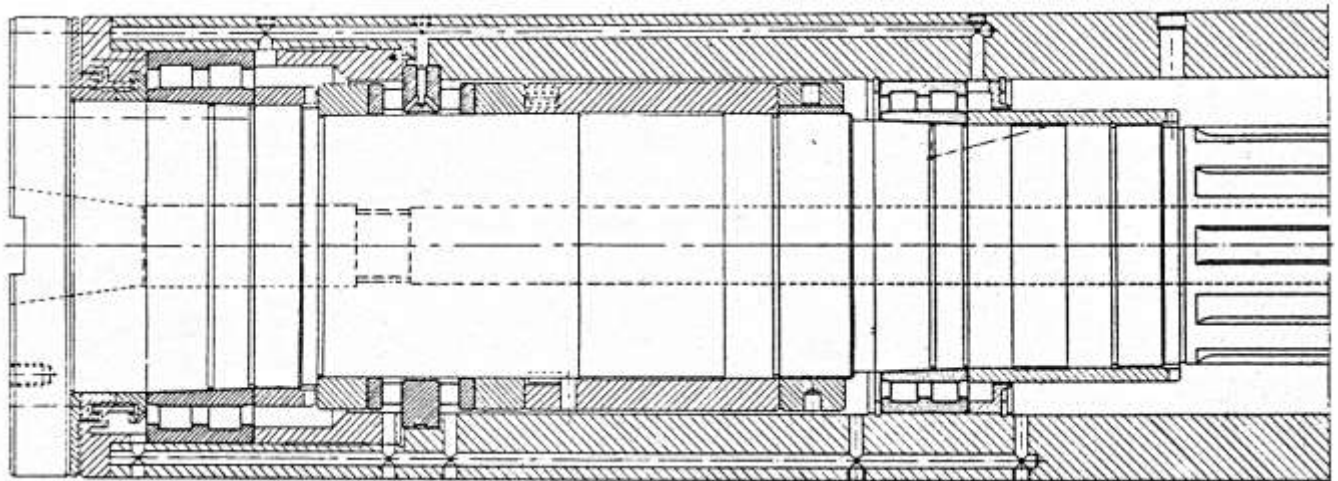


Рис. 13 Шпиндельний вузол важкого верстата із змащуванням масляним туманом (фрезерувально-розточувальний верстат мод PF-H150 фірми Waldrich (Німеччина) з потужністю привода 110 кВт, $n=4...400 \text{ хв}^{-1}$).

Повітряно-мастильне змащування містить іншу систему підготовки мастила: охолоджене повітря подається у зону тертя під тиском 0,2...0,4 МПа дозовану масло-повітряну суміш у вигляді крапель (а не туману): система об'ємного мікродозування. Схема підводу мастила показана на рис. 14, конструктивний приклад – на рис. 15.

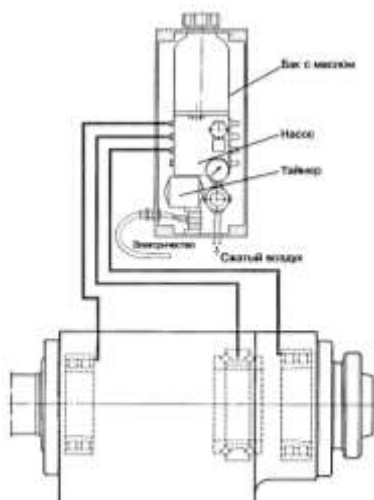


Рис. 14 Схема підводу мастила при масло-повітряному змащуванні (SKF, [17])

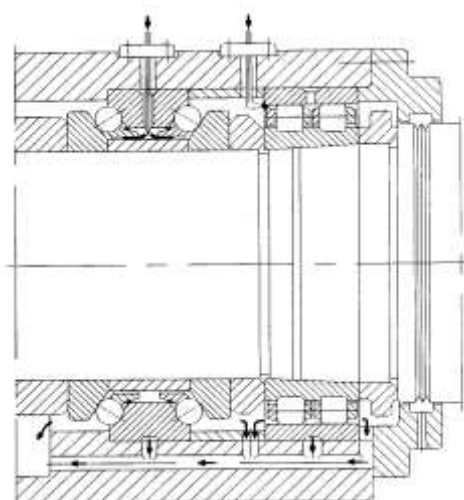


Рис. 15 Передня опора токарного верстата з ЧПК з повітряно-мастильним змащуванням.

Переваги:

- збільшена дозована подача мастила до кожної точки для захисту опор та додаткового охолодження;
- відсутнє забруднення довкілля мікротуманом;
- кількість підведеного мастила не залежить від його тиску та в'язкості ;
- спрощення конструкції ущільнень;
- можливість використати присадки;
- витрати мастила значно менші (у 10 разів), ніж при змащуванні мастильним туманом;
- змащування завжди свіжим мастилом, оскільки витрати мастила дуже незначні і після підшипника воно в систему вже не повертається.

Рекомендується для швидкісних ШВ: забезпечує $d_m n_{max} = (15 \dots 18) \cdot 10^5$ мм/хв. Системи повітряно-мастильного змащування випускає, наприклад, фірма Wyly Vogel (Німеччина).

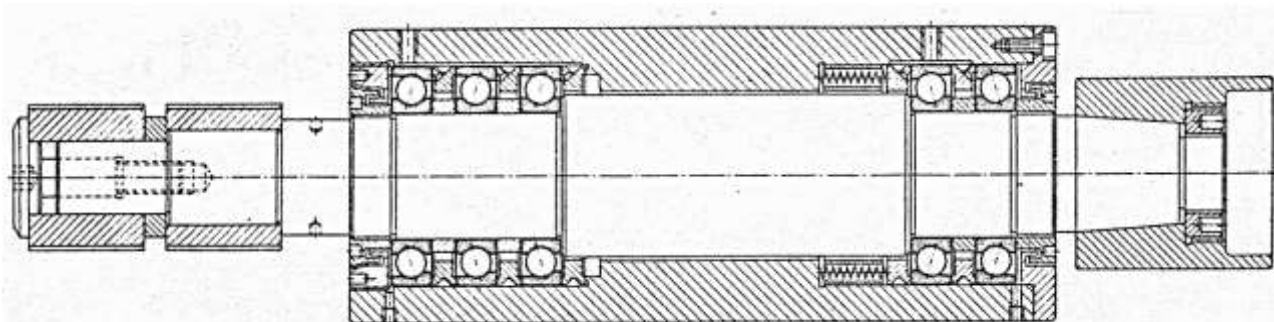


Рис. 16 Передня опора шліфувального шпинделя з повітряно-мастильним змащуванням

За високих частот обертання (до $18 \cdot 10^5$) та великих навантажень ефективніші *системи плівкового змащування* (рис. 17): транспортування стисненим повітрям невеликої заданої кількості мастила, яке утворює на внутрішніх поверхнях трубопроводу безперервну рухливу мастильну плівку, до поверхонь тертя, де утворюється рівномірний шар мастила оптимальної товщини. Для кожного вузла тертя встановлюється оптимальний режим змащування шляхом регулювання доз мастила. Здійснюють 6-10 впорскувань на годину через дюзи.

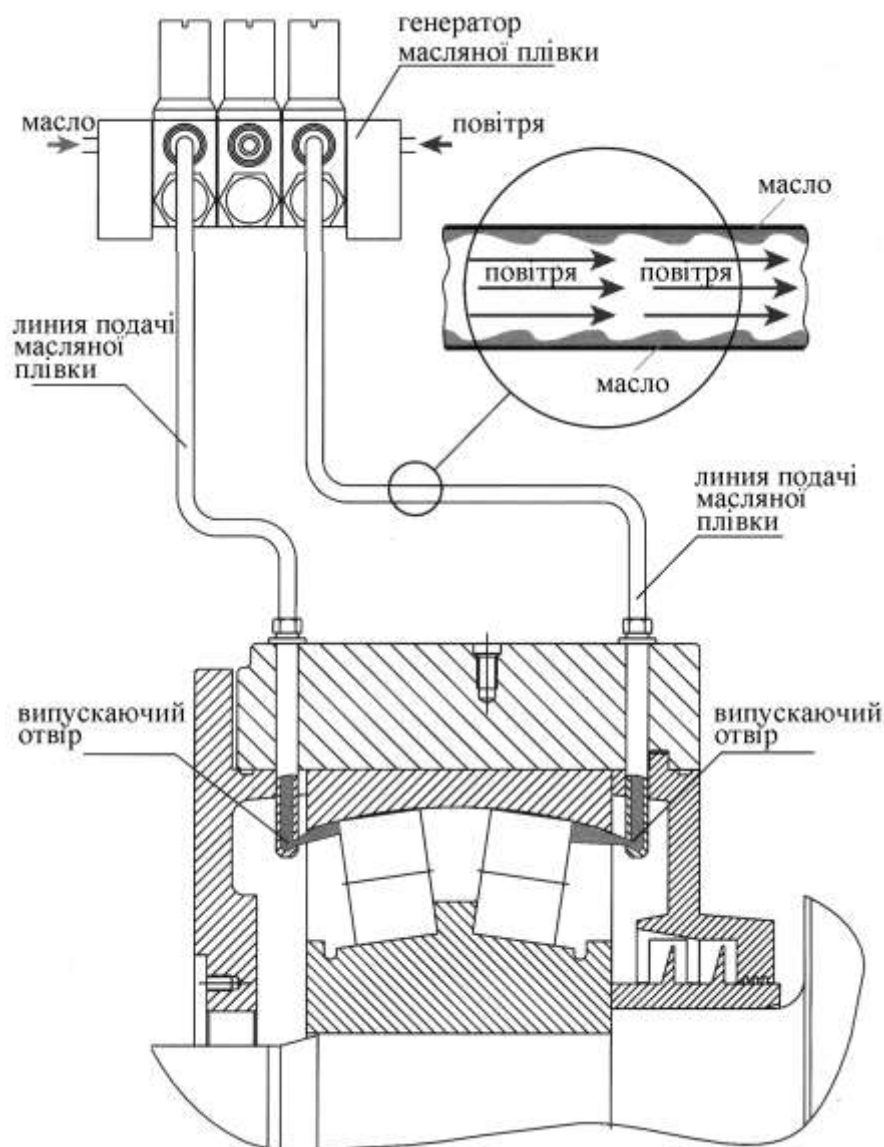


Рис. 17. Система змащувальна плівкова

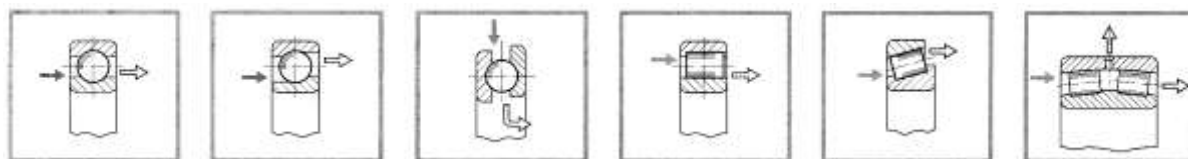


Рис. 18. Схеми подачі змащувального матеріалу до поверхонь підшипників

Відмінність СПЗ:

- можливість використання високов'язкого мастила, необхідного при великих навантаженнях.
- висока герметизація за рахунок високого надлишкового тиску (0,02...0,03 Н/мм²).
- ефективне зниження температури (в середньому на 10° у підшипниках та на шийках валу). Досягається рівномірне охолодження підшипника, що є важливим з точки зору зазорів. Переваги особливо виявляються у діапазоні високих температур – рольганги, розлив сталі, тощо (завдяки безперервній високій швидкості мастило не пригоряє).
- збільшення строку експлуатації підшипників, в середньому в 2 рази, не потрібне промивання вузлів підшипника (спрощується огляд підшипників, менше завантаженість очисних споруд).
- компактність, уніфікація системи.
- кількість точок змащування – до 3000.

Обов'язкові умови:

- Наявність регульованих дозаторів для кожного підшипника або попарно встановлених підшипників (об'єм мастила визначають експериментально).
- Достатня довжина трубопроводів (мінімум 0,5 м, максимум 10 м), щоб мастило мало час розподілитися по стінках трубопроводу (напрям та нахил труб значення не мають).
- Використання фільтрації (≤ 5 мкм) та вологовідділювачів при підготовці повітря.

В Україні СПЗ випускає (у всякому разі випускав) ВАО «Миколаївський завод мастильного та фільтруючого обладнання»

[<https://gpa.by/index.pl?act=PRODUCT&id=13>].

Таблиця 1.5.

Порівняльна характеристика систем змащування (відносно СПЗ)
(за даними ВАО «Миколаївський завод мастильного та фільтруючого обладнання»)

Технічні вимоги та вимоги	Вид змащування		
	Пластичне мастило	Масляний туман	Плівкове змащування
Витрати мастила	$0,003 \times V \times D \text{ см}^3/\text{год}$	$0,0005 \times V \times D \text{ см}^3/\text{год}$	$0,00005 \times V \times D \text{ см}^3/\text{год}$
В'язкість мастила		макс. 280 сСт	до 680 сСт та вище
Область застосування: Швидкість, мм/хв	невисока $6,0 \times 10^5$	висока ($> 10 \times 10^5$)	до 18×10^5
Великі навантаження	використання можливе	використання обмежене	ефективно
Висока температура	можлива втрата властивостей	використання неможливе	ефективно
Герметизація	існують проблеми	слабка, бо низький надлишковий тиск	висока
Обслуговування	складне, важко контролювати підшипники	не потрібне; контроль зручний	не потрібне; контроль зручний
Строк служби підшипника	строк не збільшується	строк не збільшується	строк до 2-х разів збільшується

Як підсумок, можна зазначити, що всі вказані системи мінімального змащування відрізняються конструкцією та принципом дії генераторів мастильної суміші або мастильної плівки.

1.2.3 Системи підведення рідкого мастила

Розглядають:

1. Централізована системи безперервної подачі мастила (самопливом, під тиском, різного типу розприскувачами)

2. Системи циклічної подачі мастила. Можуть використовуватися у циркуляційних системах. Дозволяють забезпечити оптимальне дозування мастила. Живильники вмикають у мережу паралельно. Перерізи трубопроводів можуть бути великими, тому можливим є застосування і пластичних мастил.

3. Централізовані системи імпульсної подачі мастила. Мастило подають до всіх одночасно. Імпульсні дозатори потребують однієї магістралі, у якій створюють імпульсний режим тиску, тобто магістраль з'єднується то з магістраллю живлення, то із зливом. При

використанні цієї системи для підшипників кочення враховують конструкцію: для радіально-упорних підшипників потрібно мастила у 100 разів більше, ніж для радіальних внаслідок ефекту прокачування мастила (радіально-упорні підшипники відкидають мастило під дією сил інерції).

Поняття одночасності тут досить умовне, бо залежить від розташування точок змащування та гідравлічного опору дозаторів та магістралі живлення. У імпульсних системах мінімального змащування витрати мастила на одну точку, яка змащується, становлять, мм³/хв: крапельна традиційна – 6...10, централізована імпульсна – більш за 0.1, мастильний туман – менше за 2.0, змащування повітряно-мастильною сумішшю – менше за 1.5.

4. Централізовані системи періодичного змащування послідовної дії є однією з найпоширеніших систем.

Мастило подають через дозатори живлення, які працюють послідовно, тобто кожна точка отримує мастило через певні проміжки часу, що визначаються часом спрацьовування всіх дозаторів, котрі розташовані послідовно до та після цієї точки.

Основний елемент системи – блок живлення, що складається з корпусу та золотників, які з'єднані каналами. Кожний золотник є дозатором, та до того ж ще й керує наступними золотниками.

Недоліком системи є відсутність регулювання при необхідності змінити дозу. Система має складне розведення трубопроводів.

5. Централізована система об'ємного мікродозування мастила з транспортуванням його до точок стиснутим повітрям (високошвидкісні ШВ: $5 \times 10^5 \leq Kv \leq 15 \times 10^5$ мм/хв).

6. Аерозольні змащувальні системи з генератором масляного туману (ШВ шліфувальних верстатів на 15 підшипниках кочення $12 \times 10^5 \leq Kv \leq 25 \times 10^5$ мм/хв).

7. Циркуляційні змащувальні системи з регуляторами та установками стабілізації температури (швидкісні ШВ ($Kv \geq 25 \times 10^5$ мм/хв) за великих навантажень).

Цікавою є інформація щодо підтримування якості масла шляхом діагностики. Наприклад, однією з рекомендацій є застосування портативного приладу SKF TMEH 1, який

показує поточні дані щодо стану масла, що в багатьох випадках усуває потребу в тривалих лабораторних дослідженнях. Прилад дозволяє оцінити зміну діелектричної постійної у пробі масла. Зміна стану масла оцінюється шляхом порівняння результатів вимірювань, отриманих на пробах свіжого масла і масла, що було в експлуатації. Зміна діелектричних властивостей безпосередньо пов'язана з погіршенням характеристик масла і з рівнем його забруднення. Прилад дозволяє визначати рівень забрудненості масла, а також виявляти ступінь механічного зносу і будь-яке погіршення його робочих властивостей. Для полегшення аналізу проб прилад оснащено цифровим індикатором.

1.3 Змащування пластичним мастилом

Вважається, що швидкохідність опор із пластичним змащуванням можна характеризувати як $d_m n_{max} \approx 6 \cdot 10^5$ мм/хв. Підвищити швидкохідність можна за рахунок спеціальних мастил (до $10 \cdot 10^5$ – у підшипниках FAG фірми), але це скорочує строк експлуатації. SKF пропонує [6] для підшипникових вузлів пластичні мастила багатоцільові (промислові й автомобільні), андизадиркові, для широкого діапазону температур, низьких чи високих температур, високих швидкостей, високих навантажень, шпинделів верстатів, опорно- поворотних пристроїв, для спеціальних та екстремальних умов, тощо.

Недоліки: відсутність ефективної теплопередачі, високе внутрішнє тертя, чутливість до зміни температури (зумовлює згущення або розрідження мастила).

Методи подачі пластичного мастила до опори кочення:

- Одноразове заповнення порожнини мастилом при складанні (герметизований підшипник).
- Періодичне поповнення та заміна мастила через прес-маслянку;
- Спеціальні системи відцентрового автоматичного відкидання надлишкового мастила.

Конструкція підшипникового вузла передбачає вільний простір для розташування пластичного мастила (містить $\approx 95^\circ$ мастила, внесеного в опору). Ступінь заповнення порожнини мастилом визначається швидкістю обертання – в межах 20-100%. У герметизованих підшипниках порожнину заповнюють на 30-60% вільного об'єму.

Для періодичного поповнення та заміни мастила передбачають отвори у зовнішньому кільці підшипника або у корпусній деталі вузла. Застосовують спеціальні конструкції для підведення мастила та видалення зайвого з порожнини підшипника або спеціальні регулятори змащування. На вертикальних валах використовують силу тяжіння для подачі мастила, а надлишкове та відпрацьоване мастило збирають у спеціальному заглибленні кришки або застосовують запірний диск.

Довговічність пластичного мастила визначається:

- Умовами експлуатації – в першу чергу температурою та частотою обертання (зменшується вдвічі при підвищенні температури на 14°C понад припустиму для конкретного мастила та при збільшенні частоти обертання на кожні 2000 об/хв. В межах припустимої частини);
- Якістю захисту опор.

В однакових умовах у циліндричних роликотпідшипниках довговічність мастила вдвічі нижча ніж у шарикотпідшипниках, а у конічних та сферичних роликотвих – у 10 разів нижча.

У внутрішньо шліфувальних головках довговічність мастила орієнтовано становить 2000 год, у токарних та фрезерних верстатах – 5000...8000 год. Цей строк значно збільшується при використанні спеціальних мастил та спеціальної апаратури.

З метою попередження надмірного підвищення температури підшипникового вузла внаслідок переміщування мастила обмежують швидкість: швидкісний фактор не більш за $1,5 \times 10^5$ мм/хв для шарикових та $0,75 \times 10^5$ мм/хв для роликотвих. Для високих швидкостей ($\geq 7 \times 10^5$ мм/хв) застосовують малов'язкі мастила. Під дією відцентрових силабо інтенсивного переміщування може виникнути сепарування (відділення мастила)

Для подачі мастила в режимі постійного й довготривалого змащування можна використати автоматичні лубрикатори, наприклад, фірми SKF типу TLMR [1], [\[https://www.skf.com/ru/products/lubrication-solutions/lubrication-systems/single-point-automatic-lubricators/electro-mechanical-single-point-automatic-lubricators/index.html\]](https://www.skf.com/ru/products/lubrication-solutions/lubrication-systems/single-point-automatic-lubricators/electro-mechanical-single-point-automatic-lubricators/index.html)

Випускають одно- та багатоточкові. Подають пластичне мастило під тиском 30 бар. Картридж є одноразовим і змінним та випускається у 2-ох варіантах ємностей: 120 та 380 мл. Час випорожнення програмований й складає від 1 до 12 місяців. Передбачено настроювання витрат мастила. Живлення від зовнішнього джерела постійного струму 12-24 В або від стандартної батареї. Встановлюють на корпус підшипника за допомогою різьбового наконечника, але може працювати незначній відстані від вузла, що змащується.. Вдале рішення для змащування у важко приступних та небезпечних місцях. Привод може бути електромеханічним чи здійснюється газогенераторним елементом (газ (водень) діє на поршень і витискає мастило із корпусу).



Рис. 20 Авто-матичний лубрикатор [1]

Таблиця 1.6 [13].

Тип системи змащування	Пластична (густа)	Крапельна мікродозована	Рідка рясна циркуляційна	Мікродозована з потоком повітря	Масляний туман	Впорскування під тиском
Коефіцієнт швидкохідності	1	1-1,1	1,3-1,4	1,3	1,3-1,5	1,6-2

Зараз широке застосування мають автоматичні системи пластичного змащення (наприклад, системи змащення SKF [6], [<https://upk.com.ua/ru/catalog/sistemi-zmashchuvannya-ta-mastilni-materiali/plastichni-mastila/>]

Переваги:

- автоматична і безперервна подача мастила 24 години в добу;
- автономна конструкція, відповідна вимогам специфікацій НАССР;
- запатентована система подачі мастила з газогенераторним елементом дозволяє експлуатувати лубрикатор за принципом «встановив і забув» протягом всього часу його використання;

- ідеально для встановлення у важкодоступних місцях на термін від 1 до 12 місяців (з програмуванням строку);
- робота системи може бути зупинена оператором у будь-який час;
- велика ємкість, компактність;

Типові сфери застосування:

- змащування вентиляторів, повітродувок, насосів, конвеєрів, електродвигунів і інших механізмів і машин, встановлених в сухих приміщеннях або в приміщеннях з підвищеною вологістю на таких підприємствах, як м'ясопереробні, овочепереробні, кондитерські фабрики, хлібопекарні, заводи по виробництву безалкогольних напоїв.

Автоматичні лубрикатори SYSTEM 24 [1] – надійна альтернатива ручному змащуванню (рис. 19).

Як вже відзначалося, близько 36% підшипників виходить із ладу через неправильне змащування (зайве або недостатнє), а також через забруднення мастила. Бригади техобслуговування витрачають багато часу на ручне змащування деталей, встановлених у важкодоступ-



Рис. 19 Автоматичний лубрикатор SYSTEM 24®

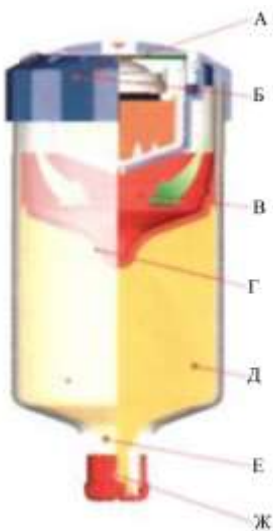


Рис. 20 Конструкція лубрикатора SYSTEM 24 [1]

них і небезпечних місцях. Автоматичні лубрикатори SYSTEM 24® (рис. 20) забезпечують безперервну подачу необхідної кількості мастила 24 години в день, 7 днів на тиждень.

А. Шкала часу змащування – спеціальний регулятор, який забезпечує легке і точне управління подачею мастила

Б. Газогенераторний елемент – елемент запатентованої конструкції, який забезпечує управління подачею газу

В. Газ (водень) – витісняє змащувальний матеріал з порожнини лубрикатора

Г. Поршень спеціальної форми – забезпечує повне спорожнення лубрикатора

Д. Прозорий корпус – який забезпечує візуальний контроль спорожнення лубрикатора

Е. Основа спеціальної форми – яка відповідає формі поршня

Ж. Різьбовий наконечник – легко вмонтовується в змащувальний штуцер в точці змазування

Головна мета програми SKF 360° Solution полягає в тому, щоб підвищити ефективність виробничого процесу і рентабельність інвестицій в устаткування. Такий підхід забезпечує зниження витрат на техобслуговування і підвищення продуктивності.

Довідка

Нижче наведений один з прикладів реалізації програми SKF 360° в харчовій галузі.

Реалізація комплексної програми змазування в масштабах підприємства забезпечує значну економію засобів. Крупний харчовий завод зіткнувся з проблемою передчасного виходу з ладу підшипників, що призводило до дорогих простоїв устаткування. Відмови підшипників були обумовлені неправильним і нерегулярним змазуванням. За наявності 150 важкодоступних критичних точок змазування непомірно роздутий штат технічного персоналу заводу був не в змозі забезпечити належну якість виконання робіт.

Запропоноване фахівцями SKF рішення передбачало установку автоматичних лубрикаторів SYSTEM 24 і впровадження системи управління, що забезпечує змазування за принципом «встановив і забув» 24 години в добу 7 днів в тиждень. Витрати на змазування були понижені. Зросла продуктивність. Були практично повністю усунені випадки пошкодження устаткування, пов'язані з відмовами підшипників, які б вимагали дорогого ремонту. Реальні цифри приведені нижче:



Рис. 21

Щорічна економія витрат на мастило.....€2 000

Прибуток від збільшення продуктивності..€10 000

Економія витрат на запчастини і оплату персоналу, що здійснює ремонт і обслуговування устаткування..€29 000

Загальна економія.....€41 000

Оптимізуйте рівень Ваших витрат. Спеціалізована комп'ютерна програма Dialset, призначена для розрахунку необхідної швидкості подачі мастила автоматичними лубрикаторами SYSTEM 24®, дозволяє контролювати і оптимізувати витрати. Ця програма доступна через інтернет і дозволяє розраховувати параметри настройок лубрикатора SYSTEM 24. За допомогою даної програми Ви можете розрахувати необхідну кількість мастила і інтервали змащування для конкретного випадку.

Ці значення переводяться в швидкість подачі, величина якої може бути задана за шкалою лубрикатора SYSTEM 24. Для автоматичного розрахунку Вам потрібно знати лише розмір підшипника і умови роботи устаткування, в якому він встановлений.

Зниження витрат на дороге пластичне мастило, призначене спеціально для використання на харчових виробництвах, а також запобігання відмов устаткування, пов'язаних з витіканням мастила або передчасним виходом з буд підшипників, дозволяє економити тисячі євро в рік.

1.4 Змащування твердими матеріалами

Практичне застосування мають: дисульфід молібдену – в сухому середовищі, графіт – у вологому – у складі композицій на основі фторопласту, м'які метали – нікель, срібло, олово, свинець, цинк тощо.

Засоби подачі до робочих поверхонь:

- Покриття тонким шаром (≈ 1 мкм) доріжок кочення та сепаратора. Недолік: малий строк експлуатації.
- Гальванічне покриття або напил м'якого металу шаром 3..5 мкм.
- Нанесення у вигляді лаку (2..4 мкм) з наступним відпалом.
- Нанесення високотемпературної пасти ($\approx 1:1$ порошок твердої мастильної речовини та мастило) шаром 1-2 мкм з наступним припрацюванням. Використовують для тихохідних вузлів.
- Впорскування у підшипник порошкової суміші за допомогою інертного газу (наприклад, азоту). Недолік: складність пристрою.

Тип мастильного матеріалу визначає конструкцію підшипника. Найширше використовують підшипники 3-х типів:

- Кільця та металевий сепаратор вкриті тонким шаром мастильного матеріалу.
- Кільця вкриті мастильним матеріалом, сепаратор виконано з антифрикційного неметалу, можливо армованого металевим каркасом.
- У металевий сепаратор запресований твердий мастильний матеріал у вигляді брикетів.

Для форсованих режимів роботи найдоцільнішою є конструкція з бронзовим сепаратором, в який запресовано брикети з фторопласту (50%) та дисульфиду молібдену (50%). При роботі підшипника шарики захоплюють частинки антифрикційного матеріалу сепаратора та розносять його по доріжкам кочення, створюючи мастильну плівку між поверхнями тертя. Процес безперервний, досягається висока довговічність за рахунок ротапринтного змащування.

Обмеженість у використанні

– Навантаження – не повинно перевищувати максимальні контактні напруження на внутрішньому кільці – 1500...2000 МПа. Твердий мастильний шар не відводить тепло і руйнується за високих навантажень;

– Частота обертання – не повинна перевищувати $0,5n_{\text{гран}}$, встановленої довідником в умовах експлуатації на пластичному мастилі;

– Температура (найнижча – для фторопласта-4 та органічних лаків, деяких паст, але в усіх випадках вона вища за припустиму у верстатобудуванні)

Для змащення підшипників кочення з низькими швидкостями обертання, які працюють при дуже високих температурах (підшипники вагонеток в сушильних печах) слід використовувати мастильні пасту з твердими наповнювачами (консистентні мастила для них не підходять), які застосовуються в невеликих кількостях, так, щоб при обертанні підшипника утворювалася дуже тонка плівка твердого змащення (паста MOLYKOTE U-n Plus). Повторне змазування можна проводити мастилом MOLYKOTE M-30, яка представляє з себе дисперсію дисульфиду молібдену в синтетичному маслі, з якої при температурі близько 180 ° С масло випаровується майже без залишку і залишає після себе тільки тверді мастильні речовини.

Як приклад наведені марки мастил [<https://docplayer.ru/52606433-Smazki-molykote-dlya-podshipnikov-skolzheniya-i-kacheniya-harakteristiki-svoystva-nyuansy.html>], які ілюструють тезу щодо випуску мастил, які адаптовано до певних умов експлуатації (зрозуміло, це не єдина фірма).

1.5 Проектування систем змащування

Для більшості верстатів – на базі уніфікованих складальних одиниць та апаратів. Розробка оригінальних конструкцій – в окремих випадках і також на базі елементів, які випускають серійно. Враховують:

- Конструкцію, характер, умови експлуатації пар тертя → визначають вид мастила та режим змащування.
- Розташування на верстаті та орієнтацію у просторі вузлів тертя, габарити верстата, кількість точок змащування.
- Доступність та зручність контролю і обслуговування.
- Межі температури довкілля та мастила.
- Наявність джерел забруднення.
- Наявність протитиснення у точці змащування або гідравлічного опору.
- Техніко-економічні показники.

У разі використання будь-яких режимів мінімального змащування потрібні випробування прототипів верстатів, щоб впевнитись, що обрано режим мінімального змащування, а не режим мастильного голодування.

1.6 Змащування підшипників ковзання

Маються на увазі підшипники ковзання із змішаним тертям, бо для підшипників рідинного тертя наявність масляної плівки певної товщини, зумовленої вимогами здійснення робочих процесів, є умовою працездатності.

Залежно від конкретних умов застосування підшипники ковзання можна змащувати консистентними мастилами, рідкими маслами, твердими мастилами або комбінувати їх [<https://docplayer.ru/85366927-Podshipniki-skolzheniya.html>]. Нові розробки і поява нових матеріалів дозволяють скоротити до мінімуму або зовсім виключити техобслуговування,

отримати заданий обмежений період служби. Проте змащування зазвичай все ж необхідне для запобігання прямого контакту між сполученими поверхнями. Це зменшує тертя і знос, запобігає різкому підвищенню температури, і таким чином допомагає уникнути можливого виникнення втоми матеріалу і корозії. Різні системи змащування підшипників ковзання розрізняються принципом дії:

- З постійною подачею масла (з циркуляцією);
- З цикловою подачею мастила (через певні інтервали);
- Без (з первинної мастилом, тобто змащування на весь строк експлуатації);
- Без технічного обслуговування і взагалі без змащування.

При постійній або цикловій подачі рідкого мастила можливо досягти майже необмеженого терміну служби (особливо при використанні рідкого масла). При одноразовому нанесенні певна кількість мастила вводиться через колектор (зазвичай це мастильні канавки або порожнини) і забезпечує подачу в підшипник в процесі його роботи протягом всього передбаченого терміну служби. Можливі при цьому робочі навантаження і швидкості обертання істотно менші, ніж при циклічній подачі мастила.

Консистентним мастилом повністю заповнюють наявну порожнину між ковзаючими поверхнями і забезпечують тонкий мастильний шар.

Підшипники, які не потребують техобслуговування, зазвичай виготовлені з або з матеріалів, що містять мастильні речовини (просочені ними або мають у складі дисульфід молібдену (MoS₂) або графіт). Використовується також порошкове мастило (наприклад, MOLYKOTE Z Powder). Як пористі самозмащувальні матеріали застосовують спечені пористе залізо або бронзу, просочені по всій поверхні їх пористої структури маслом (наприклад, мастила MOLYKOTE Q або MOLYKOTE A dispersion). У процесі роботи ці мастильні матеріали постійно підживлюють поверхні підшипника. У разі застосування при температурах, що перевищують звичайні обмеження для консистентних мастил, використовують спеціальні пасти (наприклад, MOLYKOTE U-n Plus з робочою температурою до +450 С.



Рис. 22 Зони швидкостей в разі використання підшипників ковзання
[<https://docplayer.ru/85366927-Podshipniki-skolzheniya.html>].

В деталях і підшипниках ковзання, які запускають лише епізодично, мастило може висихати після тривалого простою. Сам же підшипник, як правило, залишається працездатним. У таких випадках повторне змащування дисперсією на основі мінерального масла (MOLYKOTE A) дозволяє забезпечити і далі надійну безперебійну роботу.

Слід згадати про такі мастильні матеріали як антифрикційні покриття (АФП) – продукти, що складаються з вискодисперсних частинок твердих мастил, розподілених в суміші розчинників і в'язучих речовин і, звісно, використовуються не лише для змащування підшипників. АФП наносяться із застосуванням звичайних технологій фарбування та після затвердіння утворюють тонку (5-20 мкм), але міцну мастильну плівку. Крім виконання мастильних функцій, АФП ефективно захищають деталі від корозії і надають їм естетичний зовнішній вигляд. Тож АФП – це матеріали, подібні фарбам, які замість фарбувального пігменту містять частинки твердих мастильних речовин (той самий дисульфід молібдену (MoS_2) чи графіт або політетрафторетилен (PTFE), спеціальні тверді мастильні матеріали), рівномірно розподілені в суміші смол і розчинників.

Типовий склад АФП: тверді мастильні матеріали – 30%; в'язучі – 12%; присадки – 3%; розчинники – 55% [<https://docplayer.ru/85366927-Podshipniki-skolzheniya.html>].

Переваги застосування АФП:

- сухе і чисте мастило;
- виключно термостійкі;

- не окислюються, не випаровується і не старіють;
- працюють в вакуумі і в умовах радіації;
- ефективні після тривалого простою;
- одноразово на весь термін служби;
- мастило у вигляді тонкої плівки;
- можуть замінити деякі інші види обробки.

Питання для самоперевірки

1. Функції мастила та наслідки його нестачі або надміру. Навести залежність температури підшипника від кількості мастила в опорі.
2. Фізичні явища, які використовуються у пристроях подачі мастила.
3. Які типи мастила використовують та з яких міркувань їх обирають.
4. Охарактеризувати значення вибору в'язкості мастила.
5. Дати порівняльну характеристику змащування рідким, пластичним чи твердим мастилом (переваги, недоліки, область використання).
6. Назвати та охарактеризувати способи змащування рідким мастилом.
7. Якою мірою тип мастила та спосіб змащування впливають на швидкохідність підшипникових вузлів?
8. Описати, яким чином здійснюється циркуляційне змащування, навести схеми підведення мастила.
9. Описати, яким чином здійснюється змащування впорскуванням, навести схеми підведення мастила, назвати переваги та область застосування.
10. Охарактеризувати системи мінімального змащування.
11. Дати порівняльну характеристику систем змащування розпорошеним мастилом.
12. Охарактеризувати системи плівкового змащування: принцип реалізації, відмінності, переваги, недоліки, обов'язкові умови.
13. Назвати системи підведення рідкого мастила.

- 14.Методи подачі пластичного мастила до опори кочення і їхня конструктивна реалізація.
- 15.Автоматичні системи пластичного змащення: переваги, область застосування. Автоматичні лубрикатори.
- 16.Засоби подачі твердого мастила до робочих поверхонь, обмеження у використанні.
- 17.Конструктивна реалізація підшипників при змащенні твердим мастилом.
- 18.Змащування підшипників ковзання: типи мастила, принцип дії систем подачі мастила.
- 19.Переваги застосування в якості мастильного матеріалу антифрикційних покриттів.
- 20.Підходи до проектування систем змащування.

2 УЩІЛЬНЕННЯ ПІДШИПНИКОВИХ ВУЗЛІВ

2.1 Функції та типи ущільнень підшипникових вузлів

Функції ущільнень:

- захист підшипника від пороху, бруду та мастильно-охолоджуючої рідини;
- перешкоджання витіканню мастила.

Руйнування мастильної плівки (тобто металевий контакт у зоні тертя) та абразивні частки у зоні контакту зумовлюють зношення деталей підшипника.

Наслідки зношення підшипника:

- збільшення внутрішніх зазорів у підшипнику → зменшення зони контакту (зростання контактної напруги) → передчасне руйнування підшипника, можлива непридатність до експлуатації;
- збільшення шорсткості поверхонь кочення → зменшення жорсткості та точності обертання, зростання шуму, іноді – температури.

Для верстатів, що працюють в умовах надмірного надходження у зону різання рідини (верстати-автомати, шліфувальні верстати та ін.), а також з високою запыленістю зони різання (верстати, що працюють абразивним інструментом), якість ущільнення є вирішальним фактором, що визначає довговічність ШВ.

Ущільнюючий пристрій може містити:

- кілька ущільнень різного призначення (пороховідбійні, запобіжні від проникнення мастильно-охолоджуючої рідини в опору, для забезпечення зовнішньої та внутрішньої герметичності, дренажні отвори для відведення від опори витоків мастила та таке інше) – комбінований пристрій;
- кілька однотипних сполучених елементів – багатоступеневий пристрій.

Ущільнення для створення внутрішньої та зовнішньої герметичності підшипникових опор поділяють на контактні, безконтактні, стояночні. При тому контактні забезпечують практично абсолютну герметизацію, а більшість безконтактних лише обмежують витікання мастила.

Таблиця 2.1

Типи й умови використання ущільнень

Типи	Герметизація	Різновиди	Умови використання
Безконтактні	За рахунок форми та розмірів постійних гарантованих зазорів та втрат енергії при русі рідини між рухомими та нерухомими поверхнями. Додатково за рахунок відцентрових сил.	Щілинні, канавкові, лабіринтні.	Ефективність вище при заповненні щілин пластичним мастилом. Обмеження: нагрівання (*), тобто $V < 20 \dots 30 \text{ м/с}$
		Захисні шайби та фланці	При рідкому мастилі $V > 5 \text{ м/с}$
		Масловідбійні кільця та канавки; гвинтоканавкові ущільнення	Тільки для рідкого мастила; ефективніші за високих частот обертання та наявності кільцевої камери із дренажним каналом $V > 7 \dots 8 \text{ м/с}$
Контактні	За рахунок тертя, супроводжується зношенням сполучених елементів.	Манжетні ущільнення різного типу із шкіри, гуми, полімерів.	$V > 5 \text{ м/с}$; За наявності циркуляційного змащування та охолодження – $V > 8 \dots 10 \text{ м/с}$
Стояночні	За рахунок змінних зазорів: при обертанні працюють як безконтактні, при зупинці – як контактні	Механічні (найрозповсюдженіші ЛУД) різні конструкції манжет (V – подібні).	

* – температура краплепадіння $80 \dots 90^\circ\text{C}$ (визначається типом мастила).

Незалежно від типу [14] за конструкцією бувають:

- аксіальні: менш чутливі до радіального биття та перекосів; використовують лише у фіксованих опорах;
- радіальні: працездатні за значних осьових змішень, придатні для плаваючих опор.

Довідка

На аксіальні й радіальні поділяються

безконтактні ущільнення – за напрямком нормалі до потоку;

контактні – за напрямком зусилля, яке стискає контактну пару (пару тертя).

2.2 Безконтактні ущільнення

Характеризуються наявністю постійного гарантованого зазору.

Основна перевага: відсутність тертя та зношення у з'єднанні зумовлює мінімальні енергетичні втрати, практично необмежену довговічність.

Основний недолік: відсутність абсолютної герметизації, витоки рідини через ущільнення у разі нерухомості валу.

Розрізняють ущільнення:

- статичного типу: ущільнююча дія за рахунок дроселювання мастила у щілині чи лабіринті, тобто ефективність визначається лише геометричними параметрами з'єднання;
- динамічного типу: ущільнююча дія є наслідком виникнення тиску, що протидіє тисковій рідині; ефективність залежить від геометричних характеристик, швидкості й напрямку відносного руху елементів.

Довідка

Тобто статичними є ущільнення, які контактують (або межують) із нерухомими поверхнями і у статичному режимі між ущільненням та поверхнями деталей, які стикаються з ним, немає відповідного руху, а ущільнююча дія пристрою зумовлюється дією гідродинамічних сил, які виникають при обертанні валу. Опір перетіканню рідини в ущільненнях цього типу пропорційний її витоку через нього, тобто перепад тисків, що протидіє перетіканню рідини, залежить від витоків, а ущільнення має гарантовані витоки, які визначаються його геометричними характеристиками та властивостями рідини. Ефективність роботи цих ущільнень залежить від здатності їх поперечного перетину до радіальної або осьової деформації при монтажі. Типові приклади – прокладки і кільцеві ущільнення.

Ущільнення, які контактують із ковзними поверхнями, називаються динамічними ущільненнями і використовуються для ущільнення проміжків між нерухомим компонентом, наприклад, корпусом, і обертовим компонентом (зазвичай це вал). Вони утримують мастило усередині і не допускають попадання

забруднень в підшипниковий вузол. В ущільненнях цього типу завжди виникає тиск, що створюється самим ущільненням і визначається його конструкцією (тертям рідини об елементи поверхонь ущільнень, а також внаслідок місцевої турбулізації потоку рідини). В динамічному режимі витoki рідини між рухомими деталями обмежені або повністю виключені.

Абсолютна герметизація не забезпечується, внаслідок чого в зазорі ущільнення завжди є втрата (витікання) мастила (якщо тиск у мастильній порожнині опори $P_{оп}$ перевищує тиск оточуючого середовища $P_{сеп}$) або засмоктування повітря ззовні (якщо $P_{сеп} > P_{оп}$).

Найпоширенішими та найчастіше уживаними є аксіальні щілинні (рис. 23, а) та лабіринтні ущільнення. Аксіальна щілина є статичним ущільненням. Ефективність його визначається величиною зазору та довжиною щілини.

Радіальні щілинні ущільнення є динамічними і на їх ефективність додатково впливає відносна швидкість обертання торців диска і корпусу, що визначає у зазорі відцентрові сили інерції, у напрямку яких виникає насосний ефект. Таке ущільнення може або викидати мастило із порожнечі опори, або навпаки, всмоктувати повітря та пил.

Аксіальні статичні і динамічні ущільнення показано на рис. 23 та 24.

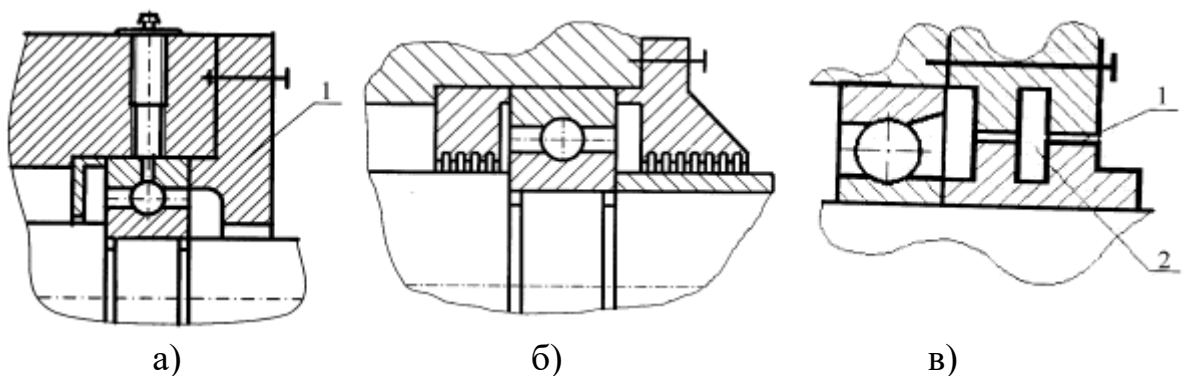


Рис. 23 Аксіальні статичні ущільнення:
а) – щілинне, б) – канавкове, в) – лабіринтне.

Щілинне ущільнення є найпростішим, але й найменш ефективним. Використовується для герметизації опор із закритими підшипниками або із пластичними мастилами. В останньому випадку опори повинні експлуатуватися у

незапорошених виробничих приміщеннях, у процесі експлуатації передбачається поповнення мастильної порожнини пластичним мастилом, а температура у порожнині опори не перевищує $60-70^{\circ}\text{C}$. У ШВ подібні ущільнення можуть застосовувати для захисту внутрішнього боку підшипника (тобто зсередини шпіндельної бабки). Ущільнення з щілиною вздовж поверхні валу чутливі до радіального биття

На спряжених поверхнях щілини можуть виконуватись кільцеві проточки (рис. 23, б) – так звані жирові канавки, прямокутної, напівкруглої, трикутної форми. Кільцеві канавки можуть виконуватися як на втулці, так і на валу, або одночасно там і там. Такі ущільнення іноді називають прямоточними лабіринтними.

Для збільшення ефективності ущільнень канавки та зазори під час складання заповнюють пластичним мастилом. Найпридатніші для цього кільцеві канавки напівкруглого профілю. (див. Додаток 2).

Такого типу ущільнення можуть застосовуватися і для опор з рідким мастилом, але лише як один з елементів ущільнюючого пристрою. В цьому разі канавки можуть бути розташовані по гвинтовій лінії: при обертанні валу вони сприятимуть зворотному рухові мастила.

Щілинне і канавкове використовують найчастіше при пластичному мастилі, для підвищення ефективності канавки та зазори заповнюють пластичним мастилом при складанні. Обмеження – температура краплепадіння пластичного мастила: не рекомендується використовувати при температурах, вищих за $80 - 90^{\circ}\text{C}$ та швидкостях на поверхні шийки більших за 30 м/с . Величина зазору обраховується [9]. Довжина аксіальної щілини $4 \dots 10 \text{ мм}$.

У лабіринтному ущільненні з дроселюванням мастила (рис. 23, в) відбувається гальмування (завихрення) рідини у вузькій ($0,05 \dots 0,1 \text{ мм}$) кільцевій щілині 1 з наступним розширенням у суміжній комірці 2 більшого об'єму. У кільцевій щілині тиск перетворюється у швидкісний напір.

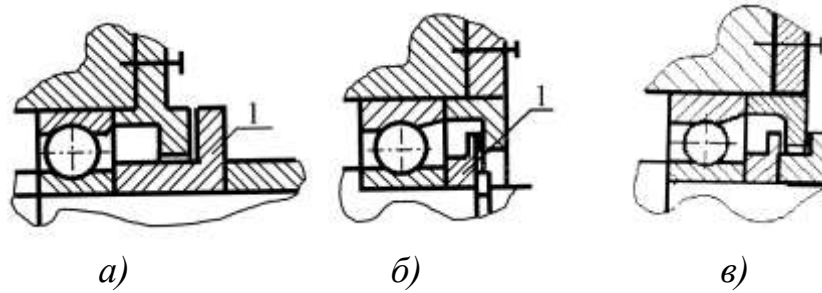


Рис. 24 Аксіальні лабіринтні ущільнення динамічного типу.

Ущільнення із зовнішнім розташуванням диска 1 (рис. 24, а) здатне “викачати” масло з порожнини, може застосовуватися лише для опор з пластичним мастилом. При $V > 12...15$ м/с на периферії диска запобігає проникненню у порожнину опори сторонніх часток.

Ущільнення із внутрішнім розташуванням диска 1 (рис. 24, б) здатне утримати рідке мастило у порожнині опори при $V > 10$ м/с, але втягує оточуюче опору повітря, тобто не придатне у випадку запоороженості. При використанні пластичного мастила неможливо застосовувати при великих швидкостях обертання диска, який переміщує масло.

Двоступеневе ущільнення (рис. 24, в) здатне утримати мастило в опорі і запобігаю проникненню сторонніх часток із оточуючого середовища за високих швидкостей ($V > 12...15$ м/с) завдяки зовнішньому розташуванню диска. За малих швидкостей неефективне.

Конструктивно аксіальні лабіринтні ущільнення можуть бути виконані з різним корпусом вздовж осі (рис. 25, а) або мати складену лабіринтну втулку (рис. 25, б).

На рис. 25, а) корпус 3 складається з двох половин, що дозволяє виконати кільцеві канали лабіринту безпосередньо на корпусі. Елементом ущільнення, що контактує з каналами, є втулка 4, яку встановлено на валу. На рис. 25, б) корпус 3 є суцільним, а кришка 4 та лабіринтна втулка 5 є складеними.

Аксіальні лабіринтні ущільнення застосовують лише для фіксуючих опор, потребують мінімальних зазорів, не придатні для плаваючих опор із самовстановленням підшипників.

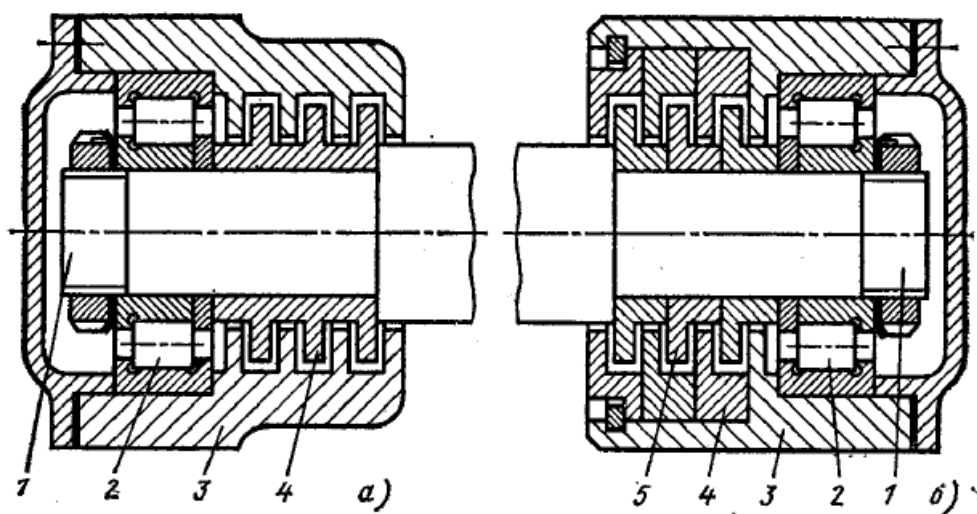


Рис. 25 Варіанти виконання аксіального лабіринтного ущільнення:

а – з різним корпусом вздовж осі; б – опора з складеною лабіринтною втулкою [9].

Ущільнюючий ефект у лабіринтному ущільненні забезпечує вузький і відносно довгий зазор, який може бути розташований радіально чи вздовж осі, а також навскіс або є комбінацією цих щілин. Додатковий ефект дає чергування розмірів щілин і їхнього розташування

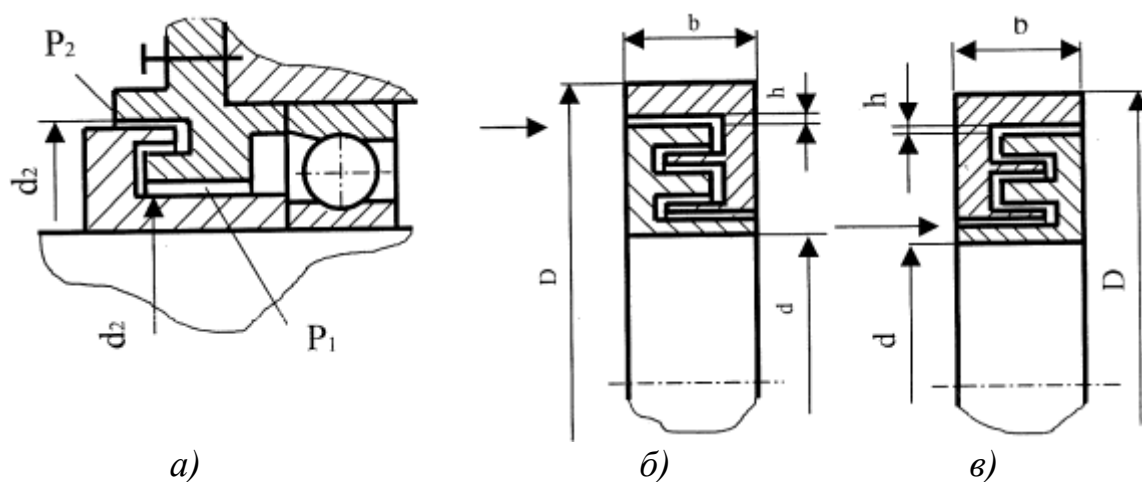


Рис. 26 Радіальні лабіринтні ущільнення динамічного типу.

Радіальні лабіринтні ущільнення складаються, як правило, з лабіринтної втулки та кришки опори (з другою частиною «лабіринту»).

Можна використовувати у плаваючих опорах.

Ущільнюючий ефект створюється чергуванням невеликих (0,06...0,7мм) радіальних зазорів з великим осьовими (2...3 мм). Найчастіше застосовують радіальні зазори 0,2...0,3 мм. Можна приймати $h_{oc} \sim 10d$, мкм; $h_w \sim (1-1,5)d$, мкм; де d – в [мм]. А також ущільнюючий ефект посилюється відцентровими силами, що відрізняються на різних діаметрах ущільнення: $d_1 < d_2$ відцентрові сили $F_{відц2} > F_{відц1}$, тобто тиски $p_1 < p_2$. З цією метою ущільнення може мати фасонну щілину змінного радіусу. Ущільнення цього типу називають також відцентровими. Найширше використовують у ШВ токарних, фрезерувальних та розточувальних верстатів, зокрема, з ЧПУ.

Треба враховувати наступне:

1. При високих швидкостях відцентрові сили які діють на потік рідини, стають значними і зумовлюють насосний ефект з обох боків шпинделя. Якщо ущільнення несиметричні, може виникнути однобічно скерована течія повітря і масла вздовж шпинделя.

Наслідки:

- винесення часток мастила із ШВ;
 - нерівномірний розподіл масляного туману та інші порушення у змащуванні вузла;
 - запорошення підшипника при зупинках ШВ внаслідок зниження тиску повітря в корпусі або втягуванні в опору повітря при її охолодженні.
2. При змащуванні підшипників масляним туманом система, включення та виключення змащування повинна забезпечити надходження мастила в опору деякий час після зупинки ШВ з метою ліквідації підсосу повітря ззовні.

Герметичність радіальних лабіринтних ущільнень залежить від розташування щілин (рис. 26): – рис. 26, б) – виконання, в якому відцентрові сили відкидають емульсію від ущільнення (подача емульсії показана стрілкою); рис. 26, в) – виконання, в якому відцентрові сили зтягують емульсію в ущільнення. Динамічний ефект зростає, якщо спряжені поверхні втулки та кришки виконати конічними. Зазор у

косій щілині повинен бути більшим, ніж в аксіальній, щоб попередити заклинювання при осьових зміщеннях валу.

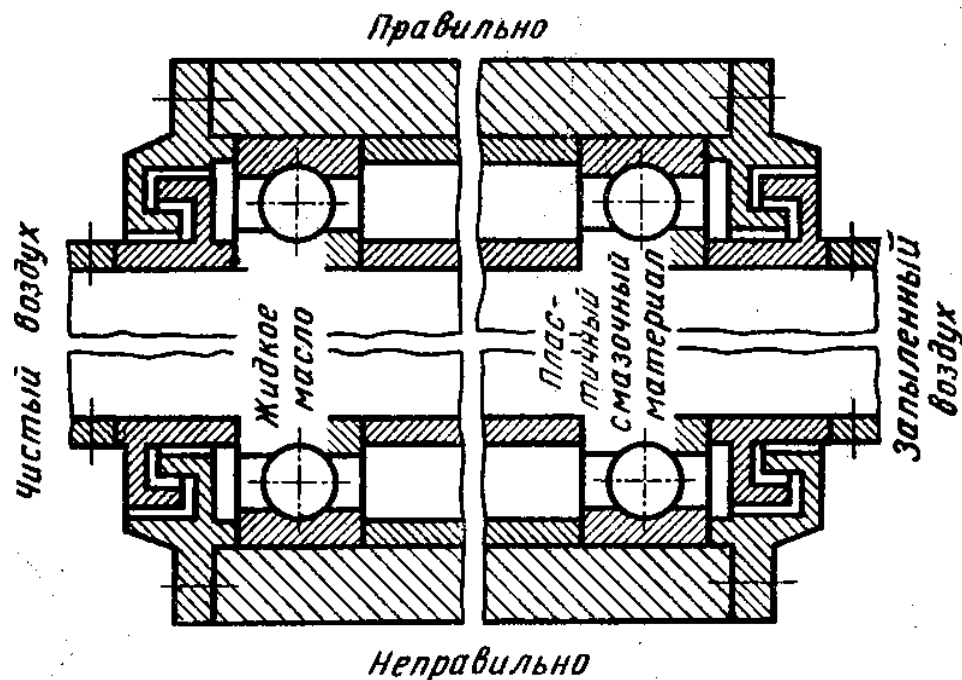


Рис. 27 Конструктивна реалізація напрямку щілин [9, 10].

лабіринтного ущільнення залежно від призначення.

Ущільнюючі пристрої на базі радіальних лабіринтних ущільнень найпоширеніші у загальному машинобудуванні (розміри наведені в довідниках), але ефективність їх з погляду герметичності невелика. Їхньою перевагою є майже необмежена довговічність та порівняно низька вартість.

Складна форма лабіринтних ущільнень підвищує їхню ефективність, але такі ущільнення мають великі габарити та велику вартість, але все ж таки не запобігають запорошуванню, якщо не при обертанні валу, то після його зупинки, коли повітря ззовні втягується у опору при її охолодженні. Ефективність ущільнення підвищується за рахунок заповнення щілин пластичним мастилом (якщо за конструкцією опора змащується рідким мастилом).

Довідка

На рис. 28, а) зображено двоступеневе лабіринтне ущільнення. На поверхні втулки виконано колові канавки 1, які забезпечують викид мастила у кільцевий канал 3 з наступним відведенням через паз 4 у порожнину опори канавки 2 (ще називають

жировими) можуть бути заповнені пластичним мастилом, що зменшить засмоктування повітря з навколишнього середовища у порожнину опори.

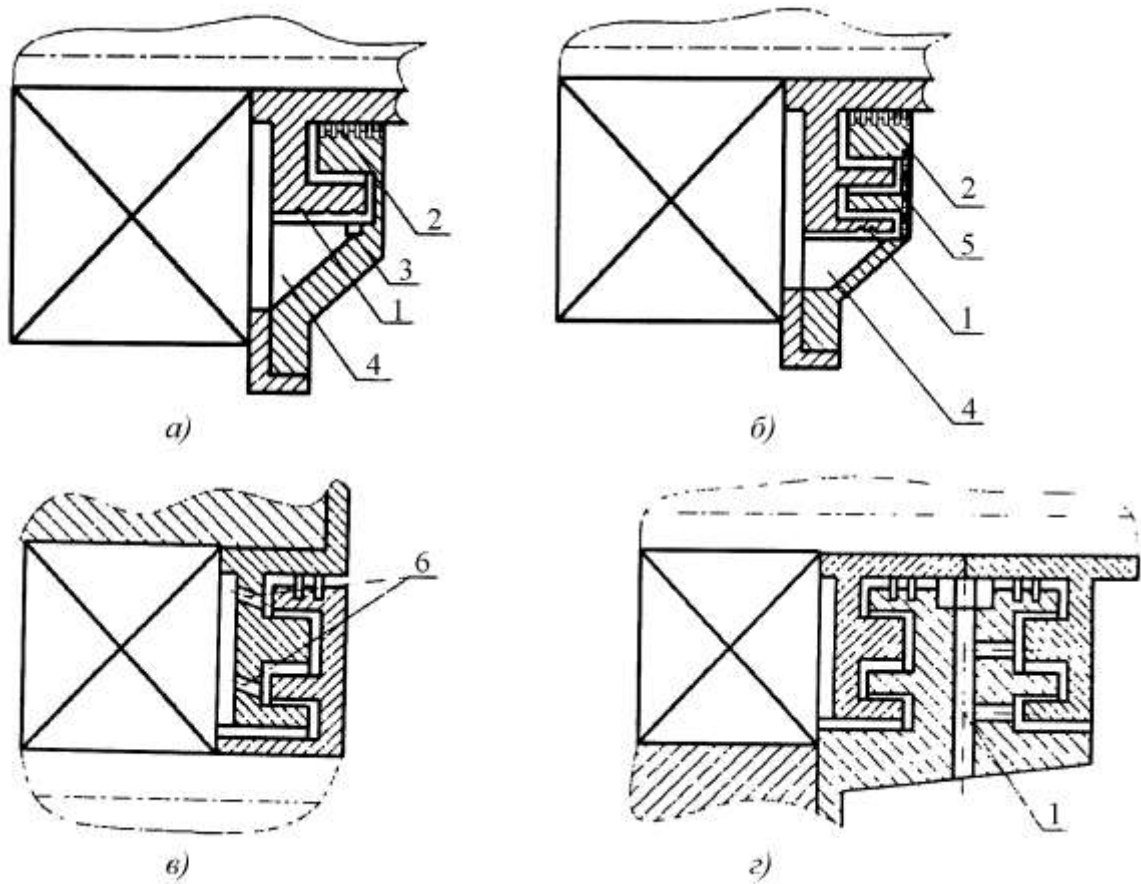


Рис. 28 Приклади конструкції лабіринтних ущільнень складних форм [10].

Опора з таким ущільнюючим пристроєм може використовуватись у промислових приміщеннях з невисоким рівнем запыленості. Контроль рівня мастила та періодичне його поповнення необхідні.

Ще вищу ефективність має пристрій з 4-ступеневим лабіринтним ущільненням (рис. 28, б). Отвір 5 призначено для періодичної подачі пластичного мастила до останньої ступені ущільнення та жирових канавок. Свіжа порція мастила кожен раз через першу ступінь лабіринтного ущільнення витискає старе разом з сторонніми твердими частками, що потрапили з оточуючого середовища. Канавки 1 та паз 4 забезпечують викид мастила у порожнину опори. З таким ущільненням опору можна експлуатувати у приміщеннях середньої запыленості без частого поповнення мастильної ванни.

Якщо жирові канавки виконати на зовнішній поверхні лабіринтної втулки (рис. 28, в), всі щілини якої заповнені пластичним мастилом, то за рахунок відцентрових сил, що виникають при обертанні валу, це мастило концентрується у зоні розташування жирових канавок та утворює так званий масляний затвор. Пристрій не потребує поповнення мастила. Для забезпечення зливу рідкого

мастила, яке проникає у щілини ущільнення, та зменшення тиску на масляний затвор, передбачають отвори 6.

На випадок експлуатації опор в умовах сильної запорошеності можна використовувати складні ущільнюючі пристрої (рис. 28, з), які мають дві частини з різними функціями: ліва утримує рідке мастило в опорі, а крива попереджує забруднення опори. У такому пристрої ефективно використовується поле відцентрових сил, що виникають у радіальних зазорах кожної з частин частини ущільнення відокремлених одна від одної жирковими канавками, заповненими пластичним мастилом. Поповнення мастила в канавках та заміна його (забрудненого – у зовнішніх ступенях) здійснюється через отвір 7. Однак при обводових швидкостях $V > 15...20$ м/с, як наслідок фрикційного нагрівання, мастило розріджується та викидається із щілин назовні.

Безконтактні ущільнення не є джерелами додаткового тертя та нагріву, але деякі з них працездатні лише з певної мінімальної швидкості (це особливо стосується динамічних ущільнень).

Крім швидкості обертання, значення мають:

- напрямок обертання (деякі ущільнення можна застосовувати лише за умови відсутності реверсів);
- робочий цикл навантаження, тобто тривалість зупинок, роботи з максимальним, середнім, мінімальним навантаженням (складний цикл навантаження може зумовити використання комбінованих або стоян очних ущільнень);
- величина радіального биття вала (за великого биття надають перевагу аксіальним ущільненням);
- вібрації опори (значний рівень вібрації не дозволяє застосовувати еластичні ущільнення (манжетні) та інші ущільнення, на характеристики яких впливають інерційні сили).

Засоби підвищенні ефективності радіальних лабіринтних ущільнень:

1. Заповнення щілин пластичним мастилом при змащуванні підшипників рідким мастилом. Обмеження: температура експлуатації (не повинна перевищувати температури краплепадіння, пластичного мастила, зазвичай у $V < 30$ м/с.)

2. Створення повітряного затвору: подача на вхід ущільнення добре очищеного повітря з цехової мережі з метою підвищення герметичності.
3. Ускладнення форми ущільнення. Наприклад, складний ущільнюючий пристрій, призначений для опор, які експлуатують в умовах сильної запыошеності (рис. 28, з) має дві частини з різними функціями: ліва утримує рідке мастило в опорі, а права попереджує забруднення опори. Частини ущільнення відокремлені одна від одної жировими канавками заповненими пластичним мастилом. Отвір 1 призначено для поповнення мастила та заміни його (витискання забрудненого). Використовують при швидкостях < 30 м/с.

Недоліки:

- великі габаритні розміри, що є значним обмеженням, особливо для перехідних опор швидкісних ШВ та досить значна вартість;
 - ефективність при змащуванні рідким мастилом все ж таки недостатня, не запобігають запыошенню, якщо не під час роботи, то після зупинки; ситуація поліпшується застосуванням додаткового пластичного мастила.
4. Розраховувати потрібні зазори за формулами [9, 10]:

- радіальні, мкм

$h_r = (1,5 \pm 0,5) d_{\text{л}}$ – для верстатів класу точності Н та П

$h_r = (1 \pm 0,5) d_{\text{л}}$ – для верстатів класу точності В, А та С.

де $d_{\text{л}}$ - діаметр лабіринтної щілини, мм

- аксіальні, мкм

$h_a \sim (10 \pm 0,5) d_{\text{л}}$ - з врахуванням компенсації осьових зміщень.

Загальномашинобудівні рекомендації дають завищені значення, особливо для аксіальних ущільнень, що зумовлює зменшення герметичності. При проектуванні ущільнень, що працюють у рідкому мастилі, треба враховувати, що витрати потужності на тертя по шару мастила елементів ШВ, які обертаються, можуть бути досить значними, особливо за високих частот обертання, тому треба обгрунтовано обирати шорсткість поверхонь цих елементів та розміри масловідводних канавок.

5. Спеціальні конструкції (наприклад, розробки фірми GMN, Німеччина – рис. 29, рис. 30).

Ущільнення серії CF придатні для високих швидкостей.

Технічні дані:

- Матеріал: сталь
- Твердість: $HRC \geq 45$
- Площина-паралелізм: $\leq 5 \mu\text{м}$
- Діапазон температури: $-(40^\circ\text{C} - 170^\circ\text{C})$
- Обмеження швидкості: немає обмеження
- Діаметр серії 60: 20 – 100 мм
- Діаметр серії 619: 40 – 80 мм

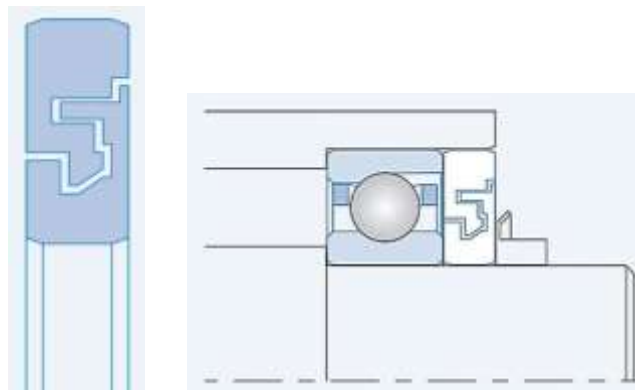


Рис. 29 Ущільнення серії CF
[<https://www.gmn.de/en/seals/series/series-cf/#collapse2eec6cf06b60fcd87e1e3>]

- Ширина: 6 мм для всіх розмірів
- Ущільнення зазору: CF-профіль
- Осьовий зазор: $S_{ax} = 1 \text{ мм}$;
- Радіальний зазор: $S_{rad} = 0,5 \text{ мм}$

Компактне ущільнення (вузька конструктивна ширина 6 мм для всіх діаметрів валу) – мала маса внутрішнього кільця з обертним валом (рис. 30).
Позиціонування лабіринту: більший діаметр ущільнювального зазору (e_2) скеровано назовні.

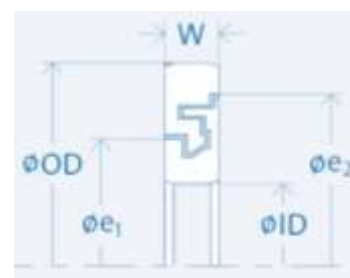


Рис. 30 Вузьке ущільнення (GMN)

6. Використання матеріалів різної твердості, зокрема покриттів матеріалами, які швидко зношуються (рис. 31, 32).

Два конструктивних варіанти показано на рис. 31, а – на корпус 2 під гребінцями 3 нанесено шар покриття, що дозволяє зменшити монтажний зазор до нуля. При температурних деформаціях гребінці проріжуть канавки у м'якому шарі покриття (графіто-талькова або алюміно-графітова суміші).

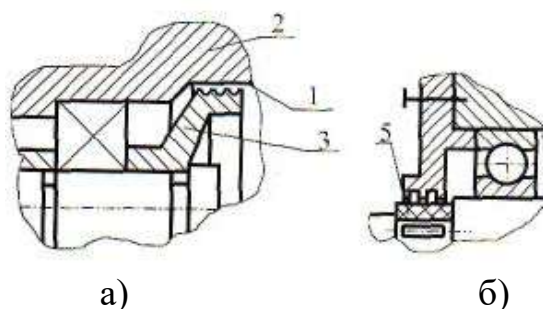


Рис. 31 Способи підвищення ефективності ущільнень

Рис. 31, б – під гребінці встановлено втулку 5 з пластмаси із коефіцієнтом лінійного розширення на порядок вищим, ніж у сталі. Із підвищенням температури

зазори зменшуються, а потім гребінці проріжуть собі канавку.

Обмеження: безпосередня близькість підшипників, у які можуть потрапити продукти зношення при прорізуванні канавок.

Для частоти 5000-7000 об/хв. фірма GMN-Leidenfrost (Німеччина) випускає кільцеві лабіринтні ущільнення, в яких застосовано матеріали різної твердості (рис. 32). Ущільнення містять сталеве внутрішнє кільце із гребінцями та зовнішнє кільце із м'якого алюмінієвого сплаву. Можуть працювати з пластичним мастилом, рідким та змащуванням масляним туманом <https://www.gmn.de/en/seals/series/series-lm/>

Рис. 32, а – тип L; рис. 32, б – тип М з дренажною канавкою для видалення та повернення рідини, яка може потрапити в ущільнення і, відповідно, у підшипник, під час сильного та прямого удару бризок.

Технічні дані для типів L та M

<https://www.gmn.de/en/seals/series/series-lm/>

- Зовнішнє кільце: Алюміній (GD AlSi 12)
- Внутрішнє кільце: нелегована сталь
- Діапазон температури: 40 ° – 200 ° С
- Діаметр валу: 15 – 210 мм
- Ширина: 10, 14, 15, 20, 22 мм (залежно від розміру)
- Висота зазору: постійно 0,2 - 0,5 мм (залежно від розміру)

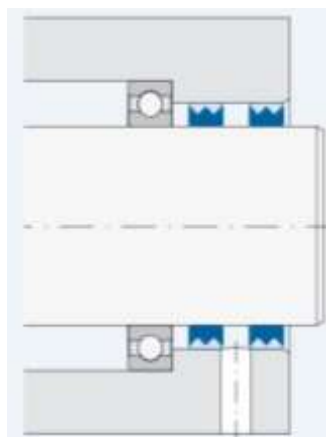


Рис. 34 Тандемне розташування

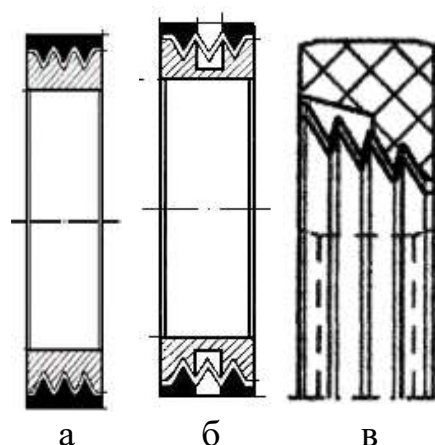


Рис. 32 Кільцеві лабіринтні ущільнення (фірма GMN)

- Ущільнювальний зазор: горизонтальний.

Невелика відстань між зовнішнім та внутрішнім кільцем становить приблизно 0,2-0,5 мм гарантує високий ефект ущільнення та високо-

ефективний захист від забруднень. Гарантовано роботу без тертя (тобто без теплоутворення), без стирання металу, що відповідає найвищим вимогам чистоти. Відсутні термічні



Рис. 33 Ущільнення типу L: зовнішній вигляд

навантаження. Мінімальні габарити (при 2-4 шарів ущільнень). Дозволяє працювати без втрат продуктивності. Термін служби – необмежений.

Спеціальні вимоги й засоби монтажу. Два металевих ущільнення, розташованих поруч, гарантують абсолютну герметичність – від витоків із середини та зовнішніх забруднень. Передбачено проміжний зливний отвір (відстань між ущільненнями мінімум 5 мм). Рідина з-поміж ущільнень надійно відводиться (рис. 34).

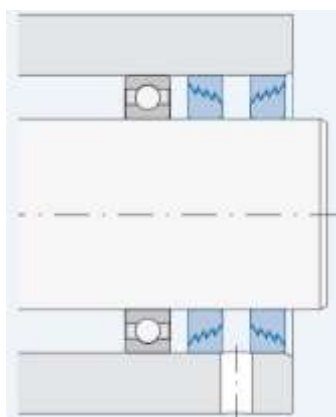


Рис. 35 Тандемне розташування

На рис. 32, в) – лабіринтні пластикові ущільнення з поліоксиметилену серій S/SA з високою стійкістю до різноманітних кислот (молочної кислоти), хімічних речовин та грибків (наприклад, для харчової промисловості). Мають конічний ущільнюючий зазор. У серії SA передбачено дренажний канал (рис. 2.10, в). Зворотний паз розміщується у нижній точці нерухомого кільця. Передбачено також і тандемне розташування (рис. 35)

[<https://www.gmn.de/en/seals/series/series-ssa/#collapse512005f79e46f18bd69ae>].

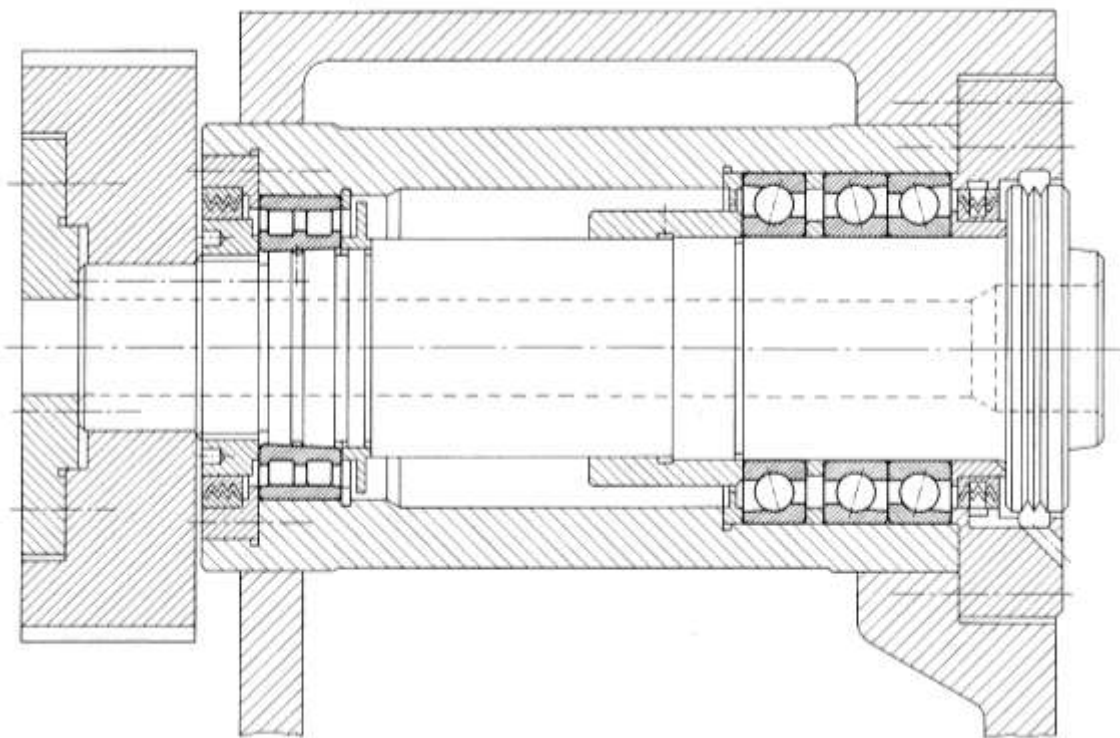


Рис. 36 Шпиндельний вузол з кільцевими лабіринтними ущільненнями

Фірма GMN-Leidenfrost (Німеччина) випускає уніфіковані ущільнення без дренажних каналів (патент ФРН № 1219745) та типу М з дренажними каналами (патент ФРН №1650083). Розроблене аналогічне ущільнення із змінним радіусом лабіринтної щілини (патент Франції №23898) та ущільнення конструкції ЭНИМС (СРСР) (а.с. СРСР №1048215, опубліковане БИ, №38, 1983).

Конструкція ШВ з ущільненнями, що їх випускає фірма GMN-Leidenfrost, наведена на рис. 36. Ці ущільнення складаються із зовнішнього кільця, яке виконано з м'якого (алюмінієвого) сплаву, та внутрішнього сталевго кільця. Кільця монтують з натягом (фірма рекомендує посадки для зовнішнього кільця К7, М7, N7, а для внутрішнього – h6, j6, k6). Для збільшення герметизуючої здатності фірма FAG, наприклад, використовує послідовне встановлення двох ущільнень із декількома дренажними каналами. Ущільнення можуть працювати як із пластичним мастилом (тип L), так і з рідким (тип М), а також із системою змащування масляним туманом. Технологія виготовлення таких ущільнень досить складна. Дещо спрощений варіант запропоновано в ущільненнях конструкції ЭНИМС (СРСР) в яких передбачено використання зовнішнього кільця з пружного матеріалу (наприклад, капролону), що розрізується перед встановленням у корпус, а потім його склеюють [12].

Особливої уваги вимагають ущільнення опор з маслоповітряними сумішами (змащування масляним туманом, маслоповітряне, інколи – змащування впорскуванням), котрі повинні забезпечити можливість виходу цих маслоповітряних сумішей з ШВ після змащування підшипників, тобто не створювати значного опору цьому процесу. Одночасно ущільнення повинні включати можливість попадання шламу та мастильно-охолоджуючої рідини (МОР) у підшипники при вимкненій системі подачі масла.

Можливими є два конструктивних рішення.

1. Використання високогерметичних ущільнюючих пристроїв безконтактного типу з малими лабіринтними зазорами, які забезпечують зовнішній захист опор від шламу та МОР. Для відведення масляного туману виконують дренажний канал, який поєднано з трубопроводом, що повертає масляний туман у систему змащування. Цей спосіб дозволяє

значно зменшити забруднення атмосфери цеха масляними парами.

2. Використання ущільнення з відносно великими зазорами, які не перешкоджають виходу масляного туману з опори. Герметичність забезпечується довгим та звивистим лабіринтом та дренажними каналами.

Ущільнення у вигляді захисних шайб та фланців (рис. 37) з упором у торець внутрішнього та зовнішнього кільця підшипника використовують досить широко: нерухомі шайби – головним чином у ШВ із пластичним мастилом, рухомі – з рідким мастилом при $V > 5$ м/с [15] (ефективність зростає у швидкісних ШВ).

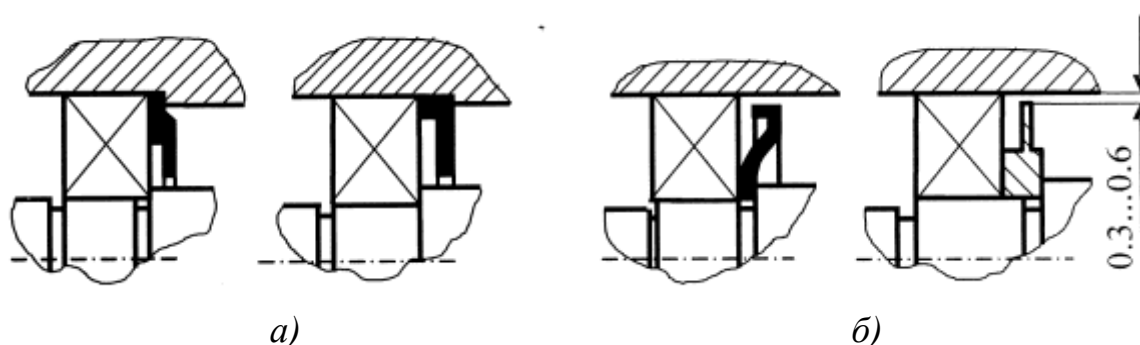


Рис. 37 Ущільнення типу захисних шайб та фланців [15]:

а) – нерухомі шайби; б) – шайби, що обертаються.

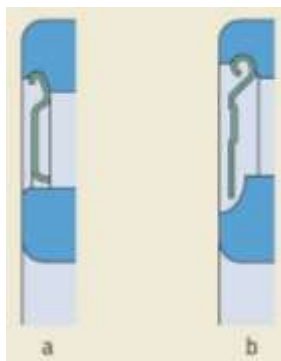


Рис. 38 Захисні шайби (SKF)

Є різновидом захисних шайб також і шайби з листової сталі розробки компанії SKF (рис. 38).

Для радіальних шарикопідшипників компанія SKF розробила безконтактні вбудовані ущільнення, які утворюють надзвичайно малий зазор з внутрішнім кільцем (рис. 39, а і 39, б), і вбудовані ущільнення з низьким коефіцієнтом тертя (виготовлені з еластомерів, армованих листовою сталлю), які

практично не контактують з внутрішнім кільцем (рис. 39, с). Обидва типи ущільнень задовольняють високі вимоги з герметизації і забезпечують мале тертя в підшипнику. Тому підшипники з такими ущільненнями можуть працювати на таких же частотах обертання, що і підшипники з захисними шайбами (рис. 38), але мають покращені ущільнюючі властивості: змащуються на весь термін служби і не призначені для повторного змащування

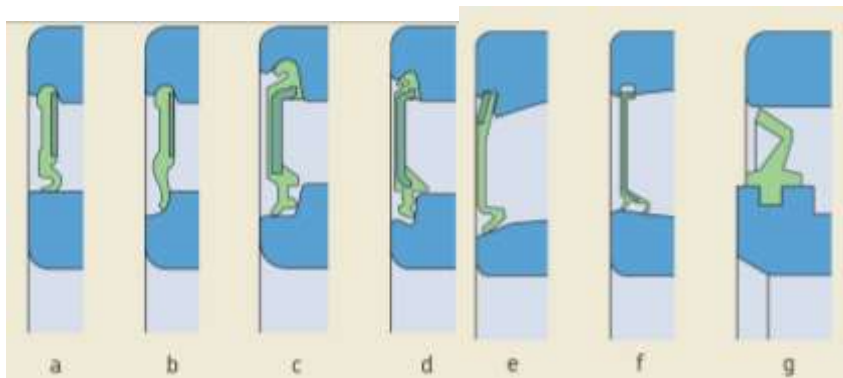


Рис. 39 Ущільнення, які вбудовуються в підшипник
[www.galp.com.ua]

Для запобігання витіканню з підшипникового вузла рідкого мастила, яке утворює на поверхні шпинделя рухливу плівку, здатну проходити крізь ущільнення, використовують масло відбійні кільця та канавки.

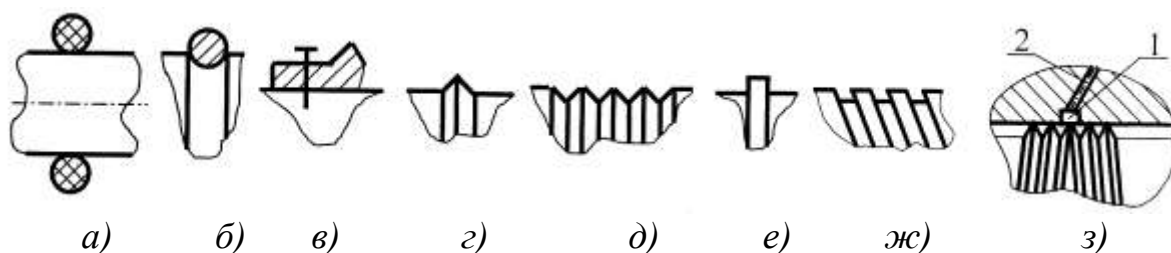


Рис. 40 Масловідбійні кільця та канавки.

Принципи дії: під дією відцентрових сил мастило заривається з гострих кромek та відкидається у порожнину кришки корпусу. Колова швидкість валу не менша за 7...8 м/с.

Ефективність масловідбійника підвищується при:

- зростанні швидкості обертання валу;
- розташуванні у кільцевій камері із зливанням дренажним каналом (рис. 41);
- послідовному встановленні кількох відбійників.

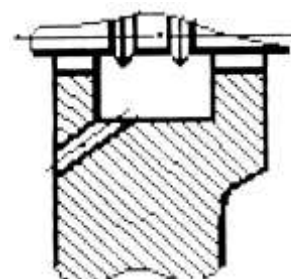


Рис. 41 Масловідбійник у камері із зливним каналом

З метою повернення рідкого мастила у порожнину опори можуть використовуватися конічні масловідбійні поверхні (рис. 42 [9]).

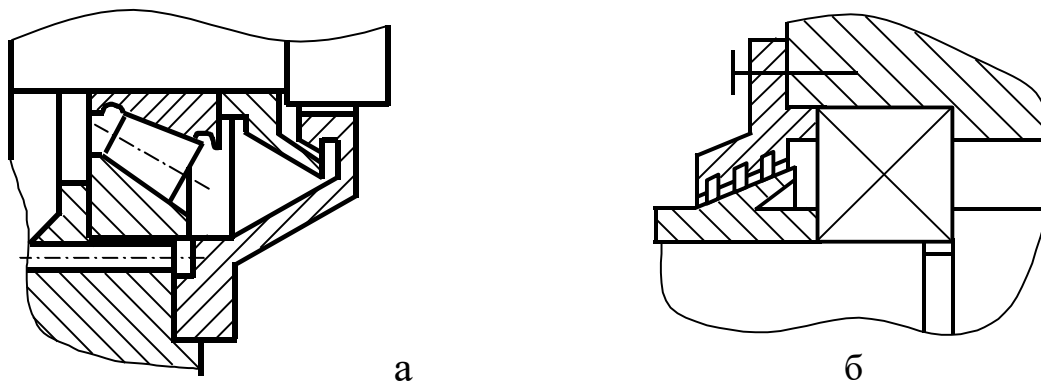


Рис. 42 Повернення рідкого мастила в порожнину опори:

а – конічні масловідбійні поверхні; б – ущільнення відцентрового типу

У відповідальних випадках застосовують трикутну циліндричну або гвинтову нарізку (з відношенням висоти до кроку 0,25 ... 0,35). Гвинтові та лабіринтно-гвинтові ущільнення ще називають аксіальними імперними [9, 42]. Використовують їх при високошвидкісному однонапрвленому обертанні для попередження витоків рідини із в'язкістю, що перевищує 10-15 сП. з кутом підйому гвинтової лінії $\beta=14-15^\circ$). Гвинтово-канавкові ущільнення, що діють за принципом шнеку, утворені багатозаходними канавками, які можуть бути нарізані назустріч одна одній (рис. 40, з; 43, б). Над стиком канавок виконують кільцеву проточку 1 під пластичне мастило із отвором 2 для його поповнення (гідрозатвор).

При обертанні зустрічних гвинтів утворюється зона підвищеного тиску – гідрозатвор, який перешкоджає забрудненню за рахунок засмоктування повітря, утримує рідке мастило та підтримує ущільнюючий ефект у разі зупинки ШВ. Конструкцію використовують при високих швидкостях (колова швидкість вала не менше за 4...5 м/с) для повернення рідкого мастила у порожнину, що ущільнюється (використовується принцип роботи шнеку для транспортування рідини вздовж валу.)

Не має принципового значення де нарізано канавку – на валу чи на корпусі.

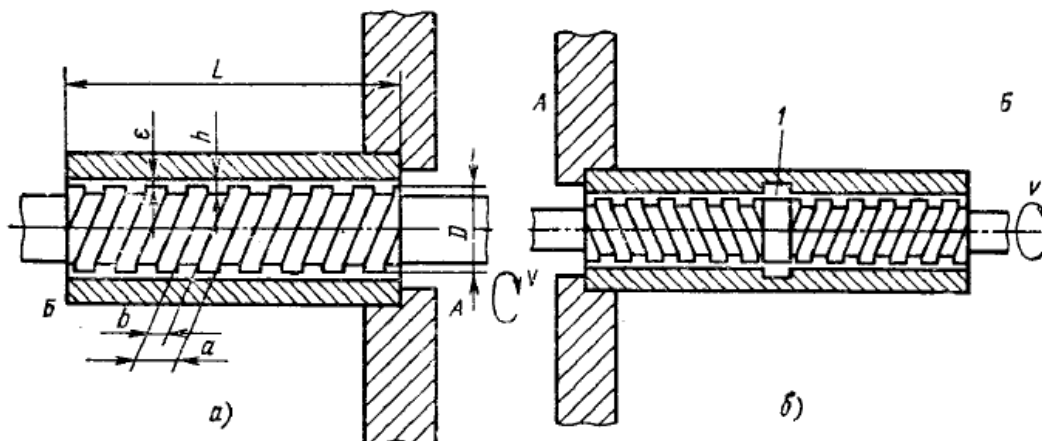


Рис. 43 Гвинтоканавкове ущільнення [9]:
а – з одnobічним нарізуванням; б – з гідрозатвором 1; позначено:
А – порожнина високого тиску; Б – порожнина низького тиску.

На рис. 44 показано застосування гвинтоканавкових ущільнень. Лабіринтно-гвинтове ущільнення відрізняється тим, що на нерухомому елементі пари також виконано багато-заходну різьбу того самого перерізу, що на рухомому елементі, але зворотного напрямку. Рідина, яка рухається по канавках нерухомої гільзи, зустрічає на своєму шляху гвинт, який обертається назустріч. Гвинт захоплює рідину й повертає її назад у порожнину, що її ущільнюють. Це ущільнення має порівняно великий зазор $(0,001-0,004)D$, де D – діаметр валу. Саме цим зумовлюється циркуляція рідини в зазорі.

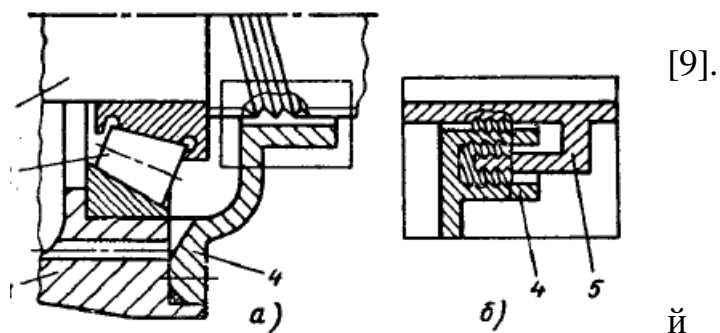


Рис. 44 Гвинтоканавкові ущільнення. а – одноступеневе; б – двоступеневе лабіринтно-гвинтове. Позначено: 1 – вал; 2 – підшипник; 3 – корпус; 4 – кришка; 5 – втулка

Відносну вартість виготовлення безконтактних ущільнень можна визначити за трьома ознаками: величина робочого зазору, кількість ступенів, складність конфігурації. Приблизна оцінка вартості наведена у Додатку 4.

В деяких важких верстатах застосовують безконтактні **пневматичні ущільнення** – так звані ущільнення з повітряним бар'єром.

Причини:

- контактні ущільнення не використовують при $V > 15$ м/с, а для шпинделів з діаметром 125 та 160 мм обертова швидкість може становити 20 м/с та більше;
- безконтактні ущільнення, зокрема щілинні, крім всіх своїх недоліків ще й не гарантують ущільнення при згині шпинделя, який викликає сили різання, що становлять 10 кН та більше.

Повітряний бар'єр створюється:

- підведенням на вхід ущільнення стиснутого повітря із цехової мережі (пневматичні ущільнення);
- за рахунок використання масляного туману.

Використання пневматичних ущільнень не викликає додаткових ускладнень у зв'язку з тим, що стиснене повітря використовується у сучасних верстатах досить широко з іншими цілями (контрольні, затискні, та струмовідвідні пристрої, обдув інструментів при їх автоматичній заміні і т.ін). Конструктивно такі ущільнення можуть бути подібні до аеростатичних опор, для їх розрахунку можуть використовуватись методики, розроблені для розрахунку аеростатичних опор. Тиск живлення цих ущільнення становить 0,35...0,4 МПа. Потрібна лише додаткова підготовка повітря, що може реалізуватися окремим блоком (тонка фільтрація – до 0,05 мкм; ступінь очищення не менше за 99%, зниження точки роси не менш 10%).

Особливо ефективні для швидкісних ШВ, розташованих вертикально: після зупинки шпинделя нагріте повітря, яке піднімається вгору викликає ефект «камінної тяги» і зумовлює засмоктування забрудненого повітря з оточуючого середовища. Можуть застосовуватися також у ШВ на гідростатичних підшипниках.

Порівняно новими є **магнітно-рідинні ущільнення** з повітряно- рідинним бар'єром.

Магнітно-рідинні ущільнення мають наступні переваги:

- можуть забезпечити повну відсутність витоків рідини через зону ущільнення (практично повна герметичність);

- поверхневий контакт елементів ущільнення здійснюється через рідину, тобто нема зношення, не потрібні ретельна обробка й високий клас точності, висока довговічність завдяки відсутності механічного контакту (біля 5 років);
- не потрібна подача мастила від зовнішнього джерела і перезарядка ущільнення феромагнітною рідиною;
- можлива робота при високих швидкостях обертання валу (до 57м/с);
- мають деяку демпфіруючу здатність і здатність самовстановлення, можуть сприймати радіальні навантаження.

Ефективність залежить від властивостей феромагнітної рідини – основної рідини й зважених частинок, які надають феромагнітні властивості. В якості наповнювача прагнуть використовувати дрібні часточки ($10^{-4} - 10^{-5}$ мм) різних металів, які можуть утворювати колоїдні розчини з рідиною (наприклад, сферичної форми частки заліза, легованого хромом). Як рідину застосовують мінеральні масла, трансформаторні масла, тощо. В'язкість середовища досить висока (біля 100 сП).

Конструктивно: Робочий зазор між шпинделем та полюсами магніту становить 0,05-0,1 мм (не більше за 0,25 мм), у робочому зазорі під дією скерованого магнітного поля знаходиться магнітна рідина яка має склад, що попереджує змішування із мастилом.

Застосовують в комбінації з безконтактними статичними чи динамічними ущільненнями.

На рис. 45 зображено комбіноване ущільнення, яке складається із статичного (кільцеве ущільнення з кільцевими циліндричними канавками) та магнітно-рідинного ущільнень [5].

Вал 1 виконано з двох половин таким чином, що одна частина має немагнітні властивості. В зоні немагнітного валу розташовують кільцевий магніт 2, наприклад, з керамічного матеріалу, таким чином, щоб один з полюсів торкався порожнини *a*, яка заповнена феромагнітною рідиною 3. Вал та корпус ущільнення циліндричні і мають кільцеві

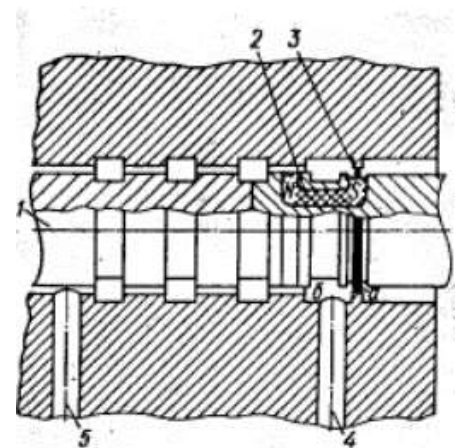


Рис. 45 Комбіноване магнітно-рідинне ущільнення

канавки, що збільшують опір течії рідини на ділянці між патрубками підведення (5) та відведення (4). Параметри статичного ущільнення й патрубка 4 обирають так, щоб забезпечити у камері b тиск не більш за 0,1 МПа [5]. За високих частот обертання валу утримуюча здатність ущільнення зменшується, що зазвичай компенсують опором статичного ущільнення або заміною його на динамічне.

2.3 Контактні ущільнення

Характерно: безпосередній контакт обертового та нерухомого елементів з'єднання вал – корпус.

Всі контактні ущільнення багатофункціональні: одночасно утримують мастило та захищають порожнину від забруднення.

Перевага цих ущільнень у порівнянні з безконтактними: майже повна герметизація опори кочення.

Недоліки (зумовлені тертям при відносному ковзанні та зношенням елементів, які контактують між собою):

- обмежена довговічність;
- енергетичні витрати (опір обертанню);
- підвищення температури;
- чутливість до кромкових тисків.

Контактні ущільнення неможливо використовувати в опорах із змащуванням мастильним туманом, бо для виходу повітромастильної суміші потрібен стабільний зазор.

У верстатобудуванні використовують різного типу манжетні ущільнення із шкіри, гуми, полімерних матеріалів (останнім часом – з термопластичних поліуретанів, що мають підвищену зносостійкість).

У порівнянні з іншими контактними ущільненнями, манжети забезпечують кращу герметичність за рахунок:

- здатності відслідковувати коливання обертового вала;
- компенсації похибок виготовлення та складання.

Мають знижені вимоги до шорсткості поверхонь контакту при встановленні (порівняно із торцевими). Поверхня шийки валу, що контактує з робочою кромкою манжети, повинна мати твердість HRC 30...50, точність обробки – за 8-м квалітетом. При $V_{обв} < 10 \text{ м/с}$ шорсткість поверхні $R_{cp} \geq 0,32 \text{ мкм}$, радіальне биття не більше ніж 0,1 мм [10]. Параметри обробки шийки валу під манжетою в залежності від частоти обертання та колової швидкості надані у Додатку 4.

Конструкцію та матеріал манжети визначають:

- умови експлуатації
- властивості середовища;
- частота обертання валу;
- якість поверхні валу;
- наявність системи відведення тепла та підводу мастила;

Ці ж самі фактори визначають довговічність манжети.

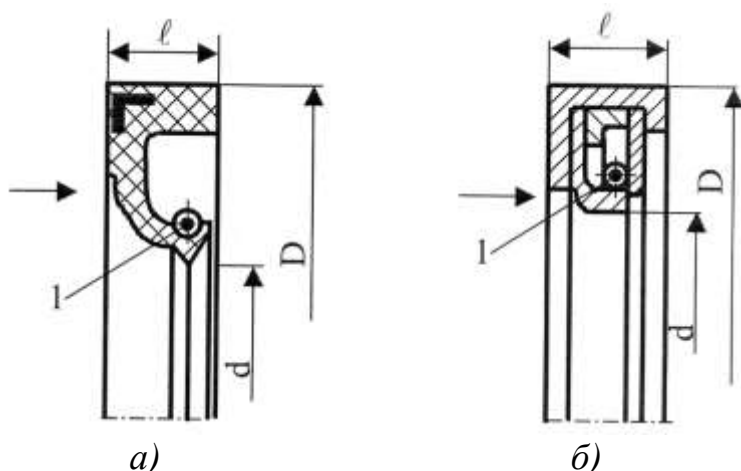


Рис. 46 Контактні манжетні ущільнення з браслетними пружинами (1):
а) – гумове армоване;
б) – шкіряне .

Характерна ознака будь-якої конструкції манжет – наявність хоча б однієї ущільнюючої губки з контактною кромкою. Найрозповсюдженіші - армовані манжети із різними поперечними перерізами.

Контакт манжет з валом забезпечується:

- пружними властивостями манжет;
- браслетною пружиною (рис. 46).

Область використання:

- ШВ з обертовою швидкістю $V < 5 \text{ м/с}$;

- ШВ з обертовою швидкістю $V < 8 \dots 10$ м/с – в разі відсутності абразивного пилю та при наявності циркуляційної системи змащування опор рідким мастилом і системи охолодження.

Не використовують в опорах із змащуванням масляним туманом, бо для виходу повітря-мастильної суміші потрібен стабільний зазор.

При цьому гумові манжети забезпечують дещо кращу герметичність ніж шкіряні, хоча за високої частоти обертання відбувається не лише зношення, а й напливання гуми на вал.

Схема встановлення манжети на вал залежить від призначення: ущільнююча кромка, скерована у бік підшипника – попереджає витікання мастила (рис. 47, а); ущільнююча кромка, скерована назовні – забезпечує захист підшипника від бруду, що надходить ззовні (рис. 47, б).

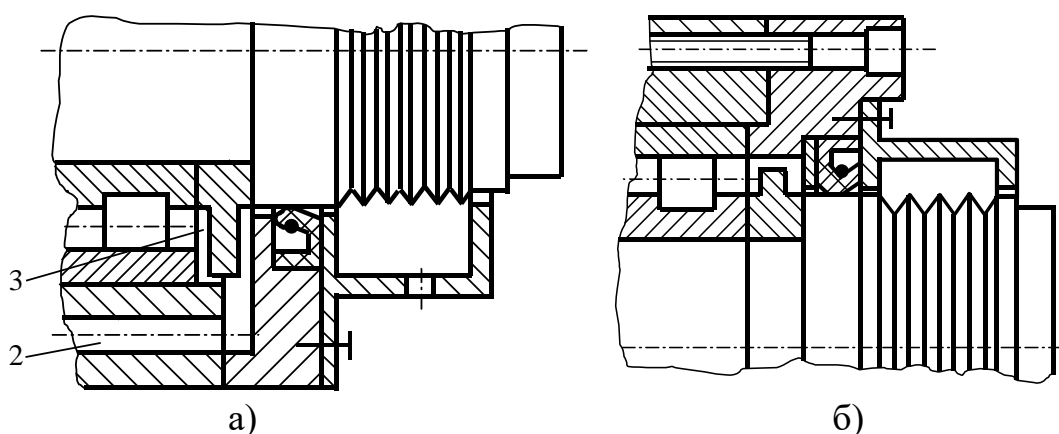


Рис. 47 Схеми встановлення манжети на вал

Для виконання одночасно обох функцій застосовують подвійні ущільнення з кромками, скерованими в різні боки. Відстань між манжетами – 3...8 мм, її заповнюють пластичним мастилом з можливістю періодичного підведення (рис. 48, позначено: 1 – канал підведення).

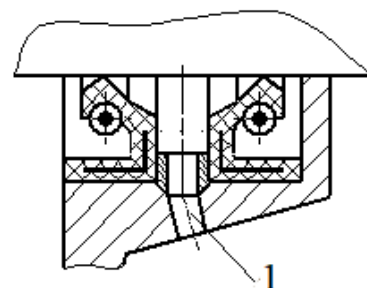


Рис. 48 Подвійне ущільнення

При перепаді тисків у порожнині підшипника

відносно оточуючого середовища більше за 0,05 МПа можливе вивертання манжети. Для запобігання цьому явищу використовують протектор у вигляді конусного упору (рис. 49) або монтують кілька манжет.

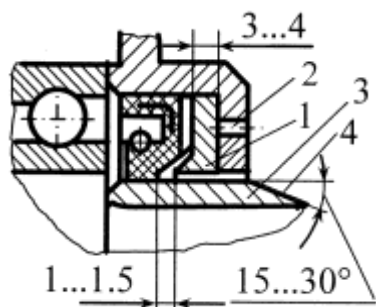


Рис. 49 Встановлення манжетних ущільнень.

1 – протектор, 2 – демонтажний отвір (2-3 отвори діаметром 3...6 мм), 3 – захисна втулка (захищає вал від зношення та знижує вимоги до якості його обробки), 4 – західна фаска для полегшення монтажу.

Неприпустимою є робота манжети в умовах сухого тертя.

Використовують конструктивні засоби зниження температури в зоні тертя (тобто підвищують довговічність манжети): охолоджуючий мастильний карман 2 або багато-західна гвинтова нарізка 3 на короткій ділянці шийки валу (глибиною 0,01...0,05 мм під кутом 30°-40°, кроком 5-10 мм.), гідродинамічний ефект, тощо (рис. 50). Напрямок нарізки повинен бути узгодженим з напрямком обертання валу. Можуть бути використані деякі додаткові конструктивні елементи у вигляді криволінійної кромки, кільцевих канавок на передній кромці, тощо [9].

Ущільнююча губка манжети контактує не з валом, а із захисною втулкою 1 (рис. 50), щільно встановленою на вал, що зменшує зношення губки й знижує вимоги до якості обробки валу. Додатково зносостійкість робочої кромки підвищує охолоджуючий мастильний карман 2 під зоною контакту (можливо використання з цією метою).

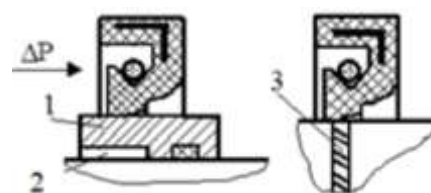


Рис. 50 Встановлення манжети з метою зниження температури.

Для зниження температури у зоні тертя фірма Electricity Association Services (Великобританія) застосовує манжетні ущільнення з охолоджуванням. Вони складаються з двох манжет, між якими міститься камера, яку з'єднано з джерелом рідини, що подається під тиском охолодженою (у систему живлення входить холодильне устаткування).

Високу ступінь герметичності обертового валу забезпечує манжетне ущільнення фірми Woodvilio Polimer (Велика Британія), яке має дві губки з різного

матеріалу, притиснуті до поверхні валу браслетною пружиною. Губка, виготовлена з гуми, забезпечує герметизацію валу при зупинці, а губка з політетрафторетілену, який має високі антифрикційні властивості – під час обертання.

Зниження сили тертя та кількості тепла, яке утворюється у зоні контакту манжетних ущільнень з обертовим валом, може досягатися за рахунок використання гідродинамічного ефекту: примусово утворюється рідинна плівка у зоні тертя, яка зумовлює виникнення гідродинамічного напору, що протидіє тиску, який викликає витікання мастила. Гідродинамічний напір забезпечується певним профілем поверхні манжети у зоні контакту з валом. Фірма Federal-Modul (США) випускає манжетні гідродинамічні ущільнення, що складаються з металевого каркасу та еластомірного елемента з губкою, яка притискається до поверхні валу браслетною пружиною. На робочій поверхні губки, яка контактує з валом, виконана кільцева канавка, у яку встановлюють кільце з політетрафторетілену. Завдяки різним механічним та фізичним властивостям (твердість, коефіцієнт тертя, модуль пружності) еластоміру та політетрафторетілену виникає гідродинамічний насосний ефект, тож використовувати спеціальні канавки не має потреби.

Для роботи в особливо важких умовах коли одночасно й швидко зношуються як манжета, так і сполучена з нею поверхня обертового вала, фірма Soc. Industrielle des Vagues d'Etanchete (Франція) розробила конструкцію ущільнення модульного типу.

Останнім часом як матеріал манжетних ущільнень все частіше застосовують термопластичні поліуретани, що мають підвищену зносостійкість.

Компенсувати зношення робочої кромки манжет можна за рахунок пружних властивостей матеріалу та специфічної форми манжети 6. Наприклад, використовують манжети нестандартної форми, які можуть бути деформовані відцентровими силами, котрі виникають на поверхні робочої кромки при високих частотах обертання.

Аксіальні манжети сильфонного типу (рис. 51) припускають перекіс валу до 4° та значні осьові зміщення торців кришки 1 та втулки 2 і можуть застосовуватись для опор, що самовстановлюються. Манжети цього типу можуть виконуватись у плаваючих опорах без додаткових пристосувань, що є досить рідкісною властивістю для аксіальних ущільнень.

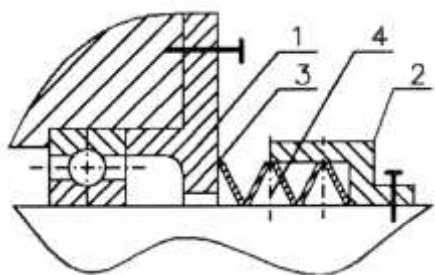


Рис. 51 Аксіальна манжета сильфонного типу.
Позначено: 1 – кришка; 2 – втулка; 3 – робоча кромка; 4 – пластичне мастило.

Використовують як ущільнення також торцеві манжети з губкою трапецієвидного перерізу (рис. 52), що містять корпус 1, губку 2, перемичку 3 та робочу кромку 4.

Це ущільнення може бути статичним – у вигляді кільцевих проточок різного профілю, або динамічним – у вигляді гвинтової канавки.

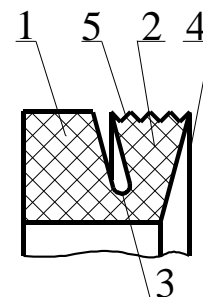


Рис. 52 Торцеві манжети

Безконтактне ущільнення в залежності від встановлення манжети забезпечує відкидання масла або попередній захист від зовнішніх забруднень, що підвищує ефективність манжети. Відцентрові сили, що виникають на губці манжети, яка обертається разом з валом, не згинають губку та не переривають контакт у парі тертя навіть при швидкостях ≥ 15 м/с [10]. Перевагою є також можливість створення додаткового безконтактного ущільнення 4 на периферії губки (за характером це стояночне ущільнення). Рекомендовані розміри торцевих манжет наведені у [10].

2.4 Стояночні ущільнення

Характеризуються змінними робочими зазорами: забезпечують герметизацію опори, коли вал нерухомий і не працюють при його обертанні.

Застосовують у комбінації з безконтактними динамічним ущільненнями, які герметизують опору при обертанні вала і неефективні при його зупинці.

Найрозповсюдженіші – механічні стояночні ущільнення як надійні та досить ефективні.

Найпростішими є конструкції, в яких контакт розмикається за рахунок дії відцентрових сил.

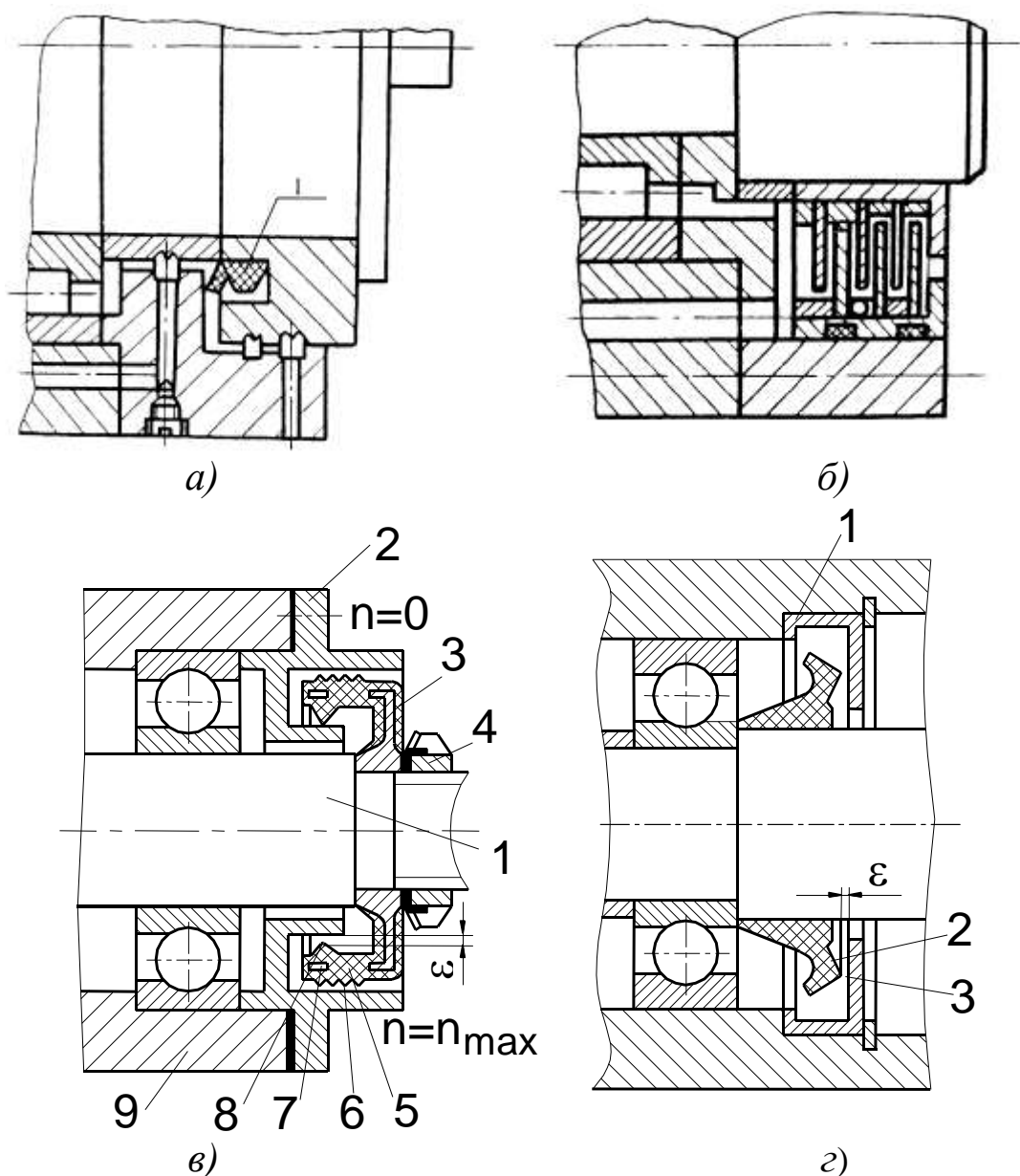


Рис. 53 Стояночні ущільнення: а) – V-подібна торцева манжета;

б) – лабіринтно-дискове (ЛУД); стояночні ущільнення – радіальне в), та аксіальне г).

V-подібні торцеві манжети можуть бути застосовані при рідкому мастилі та обводній швидкості до 25 м/с. При швидкостях $V > 15$ м/с торцеве манжетне ущільнення трансформується у радіально-щілинне (рис. 53, а).

Лабіринтне ущільнення дискове ЛУД (рис. 53, б) є комбінацією лабіринтних та торцевих стояночних: при обертанні працює як лабіринтне, а при зупинці - як контактне торцеве. Тобто за рахунок певної конструкції диски самовстановлюються і утворюють лабіринтний зазор. Розташування зовнішнього диска забезпечує повну герметичність та надійний захист опор шпинделя від засмоктування емульсії чи повітря ззовні.

Підшипниковий вузол (рис. 53, в) містить ущільнюючий пристрій, в якому кришка 2 закріплена на корпусі 9, а стояночна гумово-армована манжета 3 затиснута гайкою 4 на валу 1. У статичному режимі (верхня частина рис. 53, в, $n=0$) робоча кромка манжети 8 щільно охоплює циліндричний виступ на кришці, попереджаючи забруднення мастильної порожнини опори (витіканню мастила перешкоджає щільне ущільнення, утворене кришкою та шийкою вала). При обертанні вала важка робоча кромка під дією відцентрових сил відгинає еластичну ніжку 5, утворюючи зазор ε . Гвинтова канавка 6, виконана на поверхні манжети, запобігає забрудненню мастильної порожнини у режимі обертання. Манжета аналогічної форми може бути виготовлена не лише з гуми, але й з пластмаси, наприклад з фторопласту-4. Для досягнення потрібної пружності у цьому випадку додатково застосовують металевий елемент – хвилевидну кільцеву пружину 7.

При аксіальному виконанні (рис. 53, г) із зростанням обводової швидкості збільшується зовнішній діаметр стояночної манжети, її периферійна частина розтягується, і тягне за собою робочу кромку 3, внаслідок цього ширина манжети зменшується, губка 2 відходить від торця кришки та розмикає стик контактної пари.

Довідка

ЛУД складається із нерухомого та рухомого стаканів (4 та 1), на яких встановлено диски 3, що відокремлені кільцями 2. На бокових сторонах дисків, що обертаються, виконані гідро-аеродинамічні канавки. Гумове кільце 5 встановлюють у канавці стакану 4 таким чином, що останній може рухатись у корпусі в осьовому напрямку. Внаслідок цього, а також завдяки дії при обертанні гідро- аеродинамічної сили, між боковими поверхнями дисків утворюється однаковий лабіринтний зазор за рахунок самовстановлення дисків. Гвинт 6 фіксує стакан 4, виключаючи можливість його повороту. Стакан 1 монтують на вал за тугою посадкою кільця, а диски прикріплюють до стаканів заклепками або за рахунок посадки з натягом. Гумове кільце 5 виключає можливість витоків вздовж

посадочної поверхні та поліпшує підтримання лабіринтного зазору між дисками, що значно зменшує нагрівання (а.с. СРСР № 572622, 992875).

Ущільнення типу ЛУД (рис. 54, а) мають невисоку герметичність внаслідок самозасмоктування рідини відцентровими силами через щілину А. При встановленні ущільнень типу ЛУД так, як зображено на рис. 54, б, вони забезпечують повну герметичність та надійний захист опор шпинделя від попадання емульсії (при зупинці шпинделя, а також при його обертанні на низьких та високих швидкостях), виключають можливість засмоктування цехового повітря в опори шпинделя та практично не збільшують тепловиділення у ШВ.

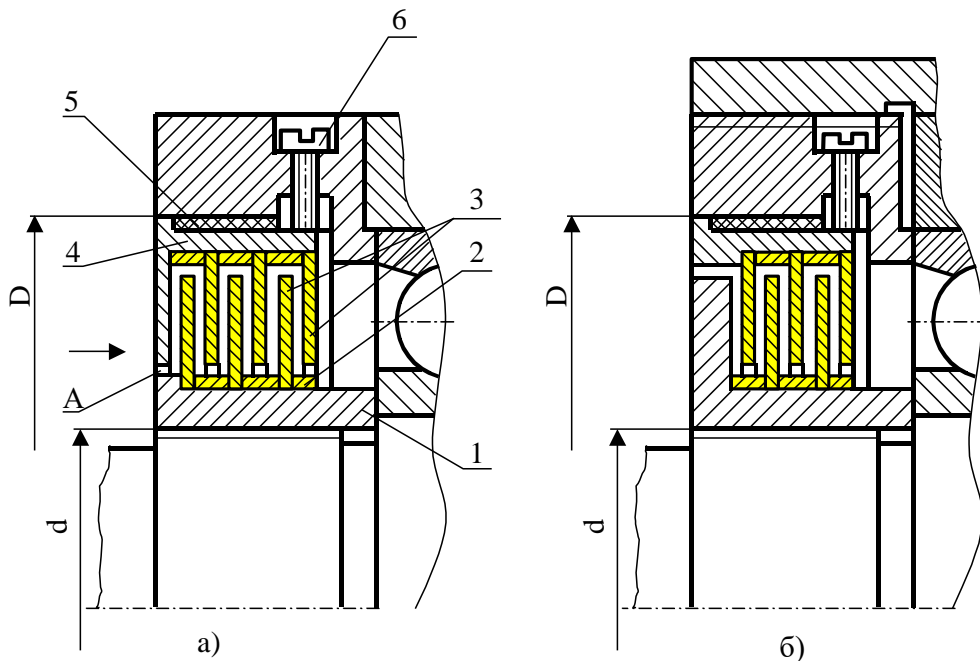


Рис. 54 Встановлення лабіринтно-дискових ущільнень

2.5 Комбіновані ущільнюючі пристрої

У верстатах широко застосовують комбіновані ущільнюючі пристрої, які компонують з елементів різного функціонального призначення. Зокрема, це можуть бути контактні-безконтактні ущільнюючі пристрої: контактні ущільнення попереджають проникнення у мастильну порожнину ззовні, а безконтактні – утримують масло у порожнині опори.

Наприклад, задня опора (рис. 55, а), що змащується пластичним матеріалом, за допомогою щілинного ущільнення В, лабіринтного Г та дренажного отвору Б захищена від проникнення в неї рідини, забрудненої продуктами зношення деталей шпindelьної бабки.

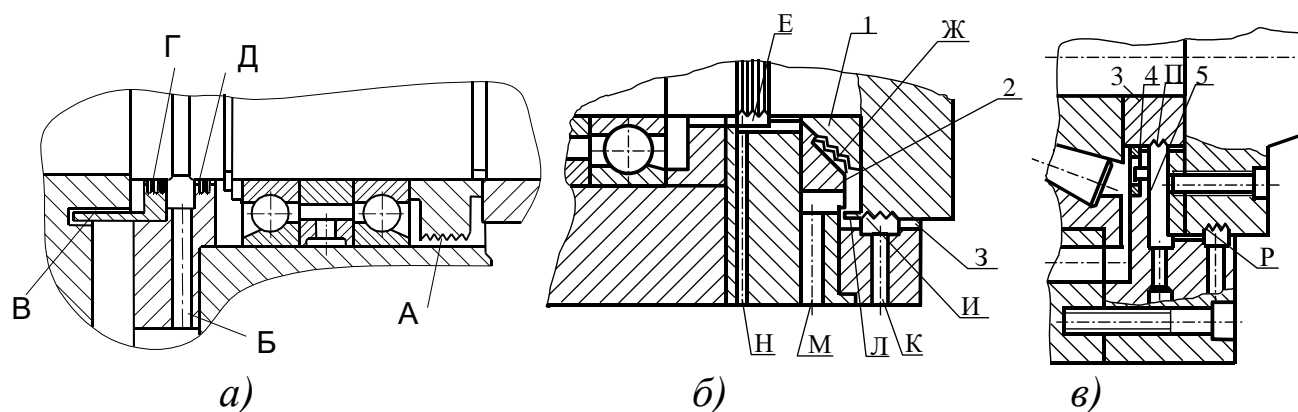


Рис. 55 Комбіновані ущільнюючі пристрої

Внутрішня герметичність цієї опори забезпечена ущільненнями А та Д. Для створення внутрішньої герметичності у передній опорі, що змащується рідким мастилом (рис. 55, б), передбачені ущільнення Е та Ж з дренажними каналами Н та М, а також лабіринтне ущільнення Л. Проникненню в опору мастильно-охолоджуючої рідини перешкоджає щілинне ущільнення З та ущільнення И з дренажним отвором К. Ущільнення, що складається з кілець 1 та 2 (рис. 55, б) має фасонну щілину Ж змінного радіусу, придатне при змащуванні підшипників пластичним матеріалом або рідким мастилом, а також мастильним туманом. У пристрої на рис. 55, в передбачені ущільнення П для відведення рідкого мастила та ущільнення Р для відведення мастильно-охолоджуючої рідини, а також комбіноване динамічне ущільнення, що містить плаваюче кільце 4, що взаємодіє з торцевою поверхнею фланця 5 та втулкою 3.

Досить широко застосовують комбіновані ущільнюючі пристрої, які складаються з безконтактних та контактних ущільнень, що дозволяє використовувати переваги обох типів [2, 3, 4].

Такі комбіновані пристрої мають високу ефективність (забезпечується контактною частиною) та підвищену довговічність (безконтактна частина покращує умови роботи

контактної). Контактні ущільнення запобігають проникненню у мастильну порожнину небажаних інгредієнтів навколишнього середовища, безконтактні – утримують мастило у порожнині опори, тобто розділяють функції окремих елементів пристрою. При конструюванні забезпечують можливість заміни контактних ущільнень, які швидко зношуються. Комбіновані ущільнюючі пристрої бажано застосовувати в опорах, що працюють у заповненому середовищі, бо у цьому випадку безконтактні ущільнення не забезпечують потрібну ефективність, а контактні – швидко зношуються.

На рис. 56, зображено підшипниковий вузол, обладнаний комбінованим контактно-безконтактним ущільнюючим пристроєм [10]. Підшипник змащується рідким мастилом.

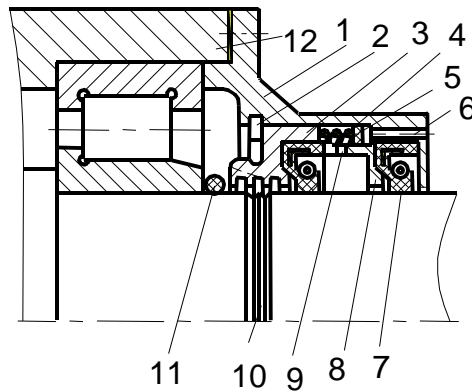


Рис. 56 Комбінований ущільнюючий пристрій.

У цьому пристрої відбувається розділення функцій: контактні ущільнення попереджають проникнення у мастильну порожнину небажаних інгредієнтів оточуючого середовища, а безконтактні утримують мастило у порожнині опори.

Ущільнюючий пристрій змонтовано у стакані 1, який кріпиться до корпуса 12 опори, а з'єднання ущільнюється прокладкою. Стопорне кільце 2 фіксує у стакані всі деталі пристрою. Така конструкція дозволяє змінювати зношені елементи (контактну частину – манжети). Для заміни зношених елементів контактної частини (манжет) досить демонтувати стакан та зняти стопорне кільце 2, яке фіксує у стакані всі деталі пристрою.

Контактна частина пристрою – це манжетне ущільнення з двох гумово-армованих манжет 7, що спираються на протектори, виконані на кришці 3 та проміжному кільці. Для рівномірного навантаження манжет ущільнення має клапан, в якому наявні отвори 6 та 9, ущільнюючу шайбу 5 та пружину 4. Пружину розраховують на навантаження

$P_{пр}=0,5\Delta P$, де ΔP – підвищений тиск оточуючого середовища (наприклад, $\Delta P=0,2$ МПа). Якщо тиск менший за $0,5\Delta P$, пружина притискає шайбу 5 та перекриває отвори 6: тиск середовища сприймає лише зовнішня манжета. Якщо тиск перевищує $0,5\Delta P$, шайба відтискається, ущільнювана рідина (або газ) заповнює міжманжетну порожнину і внутрішня манжета починає працювати.

Безконтактна частина пристрою складається з масловідбійника у вигляді гумового кільця 11, яке напресоване на вал, масловідкидаючої нарізки 10 та жирових канавок, виконаних у кришці 3.

Гумове кільце здійснює „чорнове“ відцентрове відкидання масла, „чистове“ ущільнення здійснюється жировими канавками та нарізкою, яка забезпечує видалення залишків мастила та відведення у мастильну порожнину по скісному каналу, що розташований у нижній частині кришки. Утримання мастила поліпшується у випадку постійного зовнішнього тиску. Для покращання герметичності на вхід ущільнення іноді подають добре очищене повітря з цехової мережі.

Вимоги до якості герметизації шпindelних вузлів, яка забезпечується ущільнюючим пристроями, весь час зростають у зв'язку з тим, що умови експлуатації ШВ стають все важчими з точки зору режимів різання та інтенсифікації підводу мастильно-охолоджуючої рідини у зону різання. Так, тиск мастильно-охолоджуючої рідини досягає 3,5...6 МПа, її витрати – 100..180 л/хв., а швидкість, струменю у ряді випадків перевищує 300 м/с.

Безпосередній вплив на вибір типу ущільнення має частота відносного обертання валу та корпусу. Надшвидкісні опори мають колову швидкість відносного переміщення у парі спряжених елементів ущільнення $V > 50$ м/с (це приблизно відповідає швидкісному параметру $d_m n_{max} > 10 \cdot 10^5$), швидкісні – $V > 15$ м/с ($d_m n_{max} > 3 \cdot 10^5$), звичайні – $V > 5$ м/с, тихохідні – $V < 5$ м/с. Всі контактні ущільнення мають обмеження за швидкістю (15-20 м/с – швидкісна межа в режимі граничного та сухого тертя). Їх використання у ШВ обмежується також функціональними та конструктивними особливостями, зокрема неприпустимістю нагрівання опор ШВ, особливо для прецизійних верстатів

Умови експлуатації опор кочення також впливають на вибір конструкції або матеріалу ущільнень. Для металорізальних верстатів оточуючим середовищем є атмосферне повітря різного ступеню забрудненості – тобто повітря виробничих

приміщень механообробних цехів. Для таких опор перепад тисків, тобто різниця тисків всередині мастильної порожнини підшипникового вузла та за її межами близький до нуля або є незначним (тиск повітря може змінюватися від атмосферного на рівні моря до 0,05 МПа ($0,5 \text{ кг/см}^2$) на височині кількох десятків кілометрів. Тиск у мастильній порожнині залежить від засобу подачі мастила, режиму обертання і т. ін., однак не перевищує за звичай 0,15 МПа ($1,5 \text{ кг/см}^2$) [26, 27].

Відсутність значних перепадів тиску суттєво спрощує конструкцію ущільнень. Але напрямок вектору перепаду тисків Δp під час роботи верстата змінюється: з початком обертання вала температура в опорі збільшується і тиск зростає (вектор Δp скеровано з опори), після зупинки вала вузол охолоджується і тиск падає (вектор Δp скеровано до опори). Ця обставина вимагає багатофункціональності ущільнень.

Матеріал ущільнень обирають з врахуванням температурних умов експлуатації. Хоча температура повітря може коливатися у значних межах, цей фактор не стосується умов експлуатації ШВ, особливо прецизійних верстатів, які експлуатуються у термоконстантних цехах. Так само можна не враховувати в цьому випадку вологість повітря, вплив радіації та зону, яка утворюється при роботі електрообладнання.

Запорошеність та забрудненість повітря – один з найважливіших параметрів, які беруть до уваги при проектуванні ущільнюючих пристроїв. Для контактних ущільнень небезпечними є частки діаметром 1-5 мкм, що можна порівняти з зазором у парі тертя, який визначається мікро нерівностями на поверхнях тертя та мастильною плівкою між ними.

Конструктивні та експлуатаційні параметри ущільнень обирають на стадії проектування і вони залежать від умов роботи ШВ, типу системи змащування, розташування осі обертання шпинделя та інших параметрів. Вибір обґрунтовують з погляду оцінки герметичності, тепловиділення та довговічності ущільнень в потрібному режимі роботи з врахуванням засобу підводу мастильно-охолоджуючої рідини у зону різання та можливості вбудовування ущільнень у ШВ.

У випадках, коли виконання подібних розрахунків ускладнено, можна використати наведену нижче таблицю 2 відповідності конструктивних та

експлуатаційних параметрів [12]. У таблиці позначено через “1” стверджувальну відповідь, а через “0” – негативну. У таблиці наведені результати порівняльного аналізу найуживаніших ущільнень.

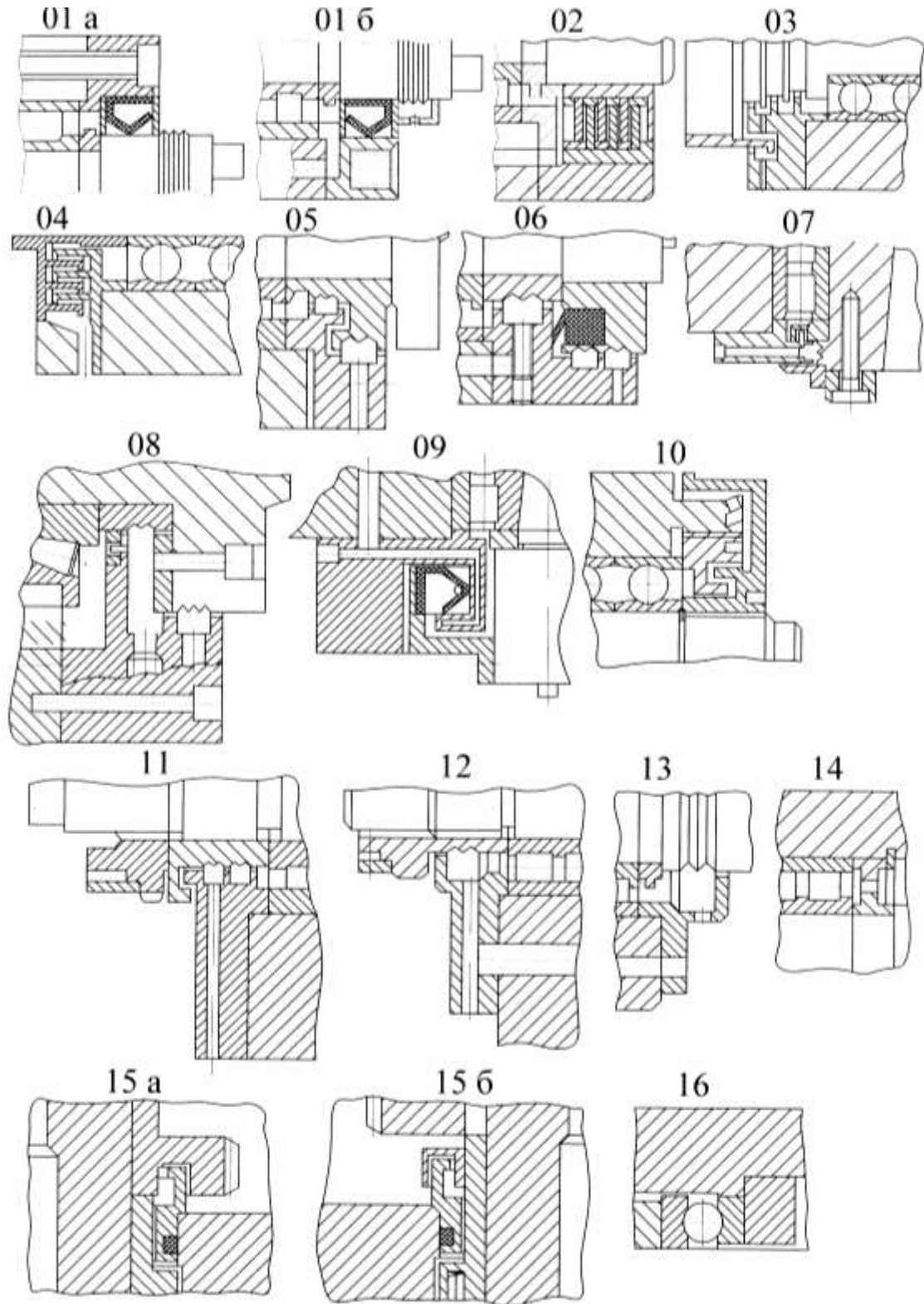


Рис. 57 Варіанти ущільнень до таблиці

Таблиця 2.2

Умови експлуатації ущільнень																						
Варіанти ущільнень	Опора		Розташування ущільнення		Метод змащування опори					dn _{max} мм об/хв			Розташування осі обертання опори			Зовнішнє середовище			Місце розташування привода			
	Передня	Задня	Зовнішнє	Внутрішнє	Пластичним мастилом	Крапельне	Циркуля- ційне	Масляним туманом	Впорску- ванням	до 1,5×10 ⁵	понад 1,5×10 ⁵ до 5×10 ⁵	понад 5×10 ⁵	Горизон- тальне	Вертикаль- не А	Вертикаль- не Б	1	2	3	Між опорами	На задньому кінці (шків, муфта)	На передньому кінці (зубчасте колесо)	
01а	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0	1	1	1	1	1	
01б	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	1	1	1	1	
02	1	0	1	0	1	1	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	
03	1	0	1	0	1	1	0	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	
04	1	0	1	0	1	1	0	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	
04	0	1	1	0	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	0	0	1	0	
05а	1	0	1	0	1	1	0	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	
05б	0	1	1	0	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	0	0	1	1	
06	1	0	1	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1	
06	1	0	1	0	1	1	0	0	0	1	1	0	1	0	1	1	1	0	1	1	1	
07	1	0	1	0	1	1	0	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	
08	1	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	
09	1	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1	0	1	0	1	0	1	1	1	1	1	
10	1	0	1	0	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	
10	1	0	1	0	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	
10	0	1	1	0	1	1	0	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	
11	0	1	1	0	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
11	0	1	1	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	
12	0	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	
12	0	1	1	0	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	
13	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0	1	
14	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	0	1	1	
14	0	1	0	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	
15	1	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	0	
15	0	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	1	0	0	
16	1	1	0	1	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	
16	1	1	0	1	0	0	1	0	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	0	1	1	

Примітка :

- – А – передній кінець шпинделя звернено вгору, Б- те ж саме до низу.;
- – І – малозабруднена (наявна зливна стружка, відсутня мастильно-охолоджуюча рідина);
 II – середньозабруднена (наявність будь-якої стружки та крапель мастильно-охолоджуючої рідини);
 III - сильнозабруднена (наявність будь-якої стружки, абразива та великої кількості мастильно-охолоджуючої рідини);

Питання для самоперевірки

1. Функції ущільнень.
2. Що таке комбінований і що таке багатоступеневий ущільнюючий пристрій?
3. Охарактеризувати типи, різновиди, умови використання ущільнень. Навести приклади зображення кожного з типів.
4. Що таке аксіальне й радіальне ущільнення? Область використання.
5. Охарактеризувати різницю між ущільненнями статичного й динамічного типів.
6. Яке ущільнення забезпечує повну герметичність порожнини?
7. Які ущільнення можна використовувати у плаваючих опорах? В фіксованих опорах?
8. Навести приклади аксіальних ущільнень статичного та динамічного типів. Дати характеристику.
9. Навести приклади лабіринтного ущільнення – аксіального та радіального.
10. Пояснити, чим створюється ущільнюючий ефект у лабіринтних радіальних ущільненнях.
11. Назвати засоби підвищення герметичності
12. Яким чином забезпечити одночасне утримування масла у порожнині підшипника та захист від затягування ззовні пилу чи емульсії?
13. Назвати негативні наслідки ускладнення форми ущільнень на основі радіальних лабіринтних.
14. Охарактеризувати кільцеві лабіринтні ущільнення (назвати основну перевагу), навести схемне зображення ущільнення та розташування у опорі.
15. Навести конструктивні схеми й охарактеризувати ущільнення типу захисних шайб.
16. Навести конструктивні схеми й охарактеризувати принцип дії масловідбійних засобів., зокрема гвинтоканавкових ущільнень.
17. Що таке і де використовуються аксіальні імперлерні ущільнення.
18. Охарактеризувати принцип дії пневматичних ущільнень і пояснити причини їхнього застосування.

19. Охарактеризувати принцип дії і переваги магнітно-рідинних ущільнень.
20. Навести приклади контактних ущільнень (конструктивні схеми), охарактеризувати переваги й недоліки порівняно із безконтактними.
21. З яких міркувань обирають матеріал манжетних ущільнень.
22. Навести схеми встановлення манжети на вал і наслідки вибору конкретної схеми.
23. Яким чином можна знизити теплоутворення у зоні контакту манжетних ущільнень.
24. Навести приклад стояночного ущільнення. Пояснити принцип дії. Вказати область використання.

Додатки

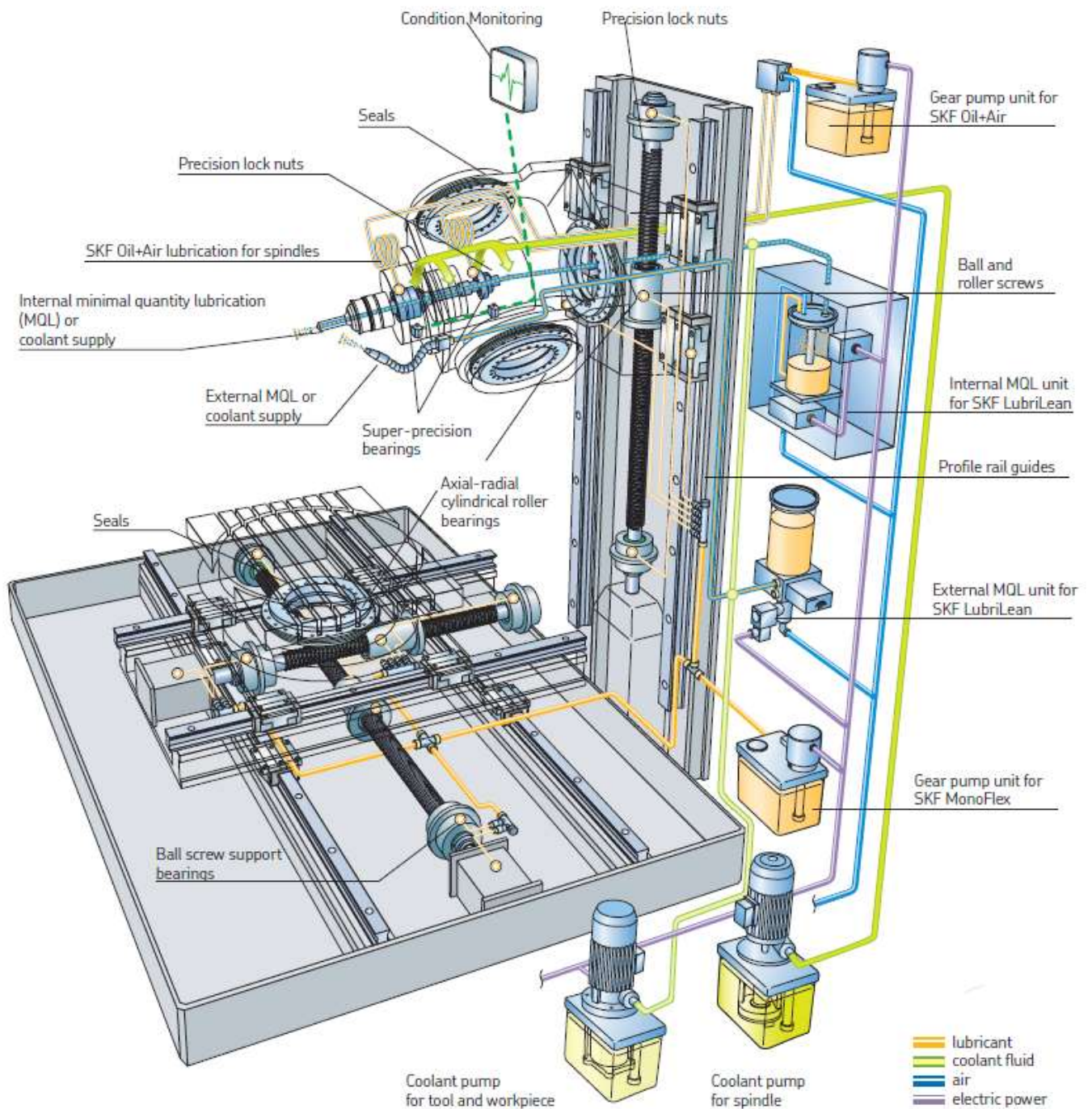


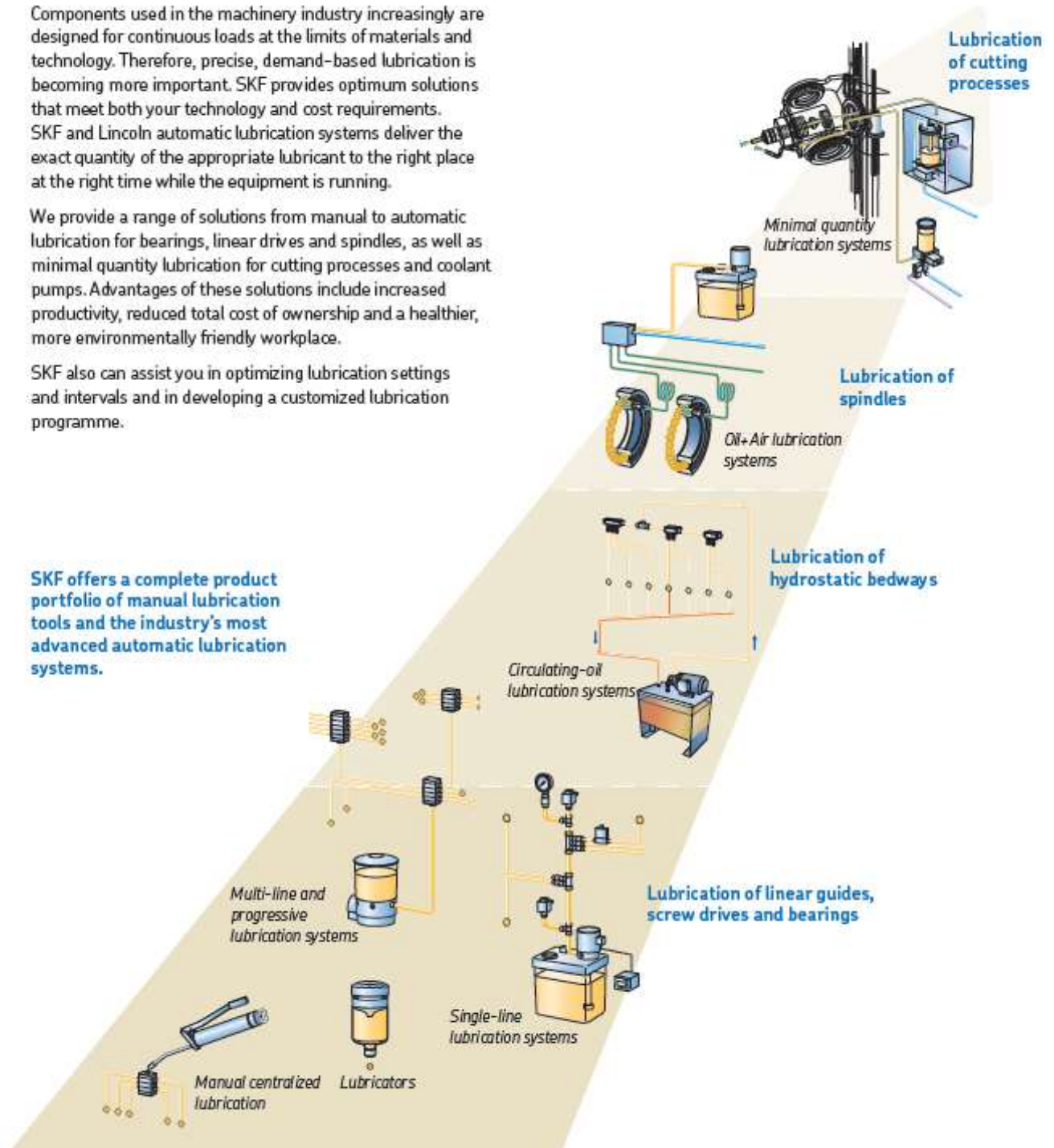
Рис. Д1-1 Система змащування верстата (за даними фірми SKF) [21]

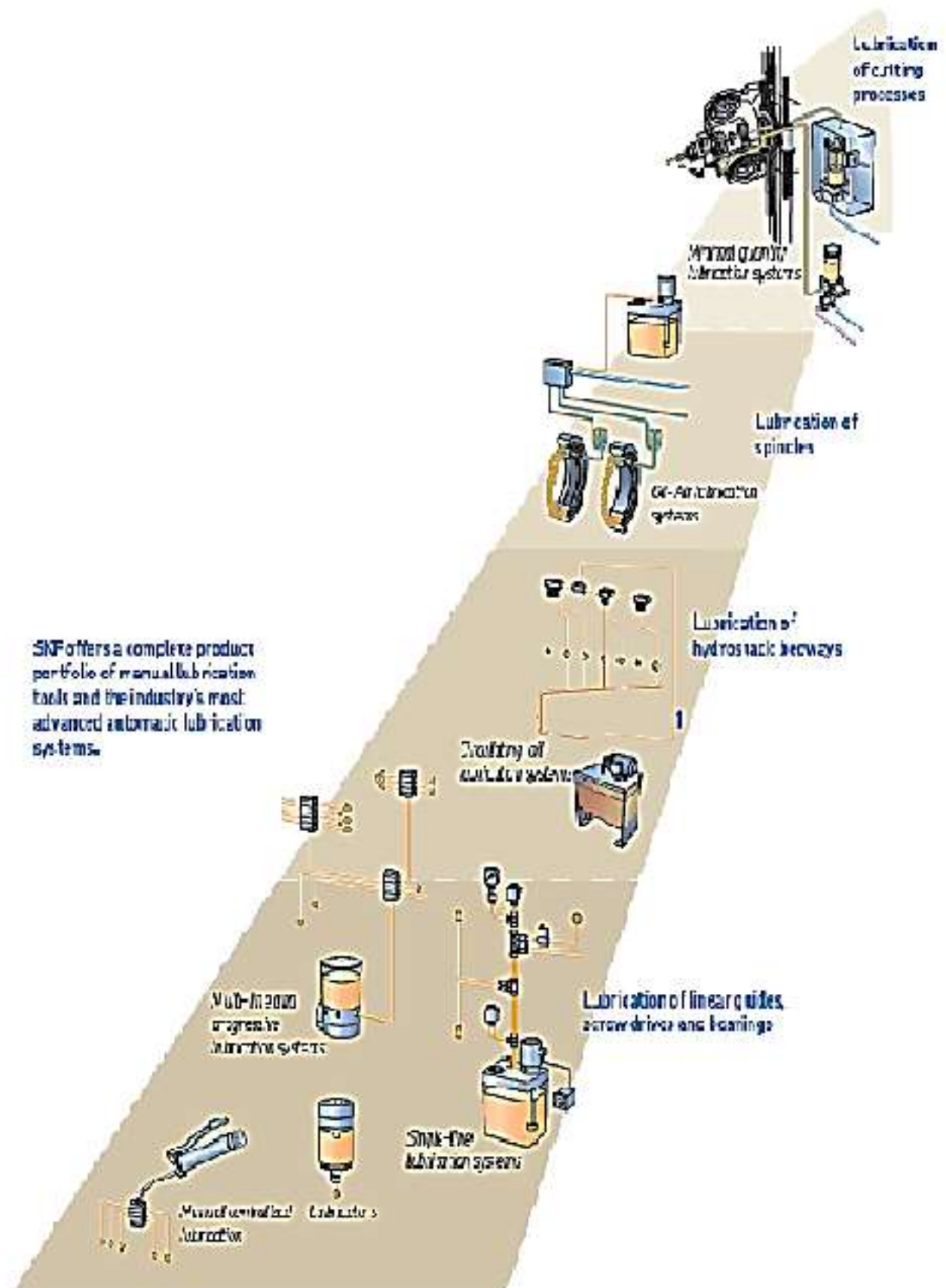
Components used in the machinery industry increasingly are designed for continuous loads at the limits of materials and technology. Therefore, precise, demand-based lubrication is becoming more important. SKF provides optimum solutions that meet both your technology and cost requirements. SKF and Lincoln automatic lubrication systems deliver the exact quantity of the appropriate lubricant to the right place at the right time while the equipment is running.

We provide a range of solutions from manual to automatic lubrication for bearings, linear drives and spindles, as well as minimal quantity lubrication for cutting processes and coolant pumps. Advantages of these solutions include increased productivity, reduced total cost of ownership and a healthier, more environmentally friendly workplace.

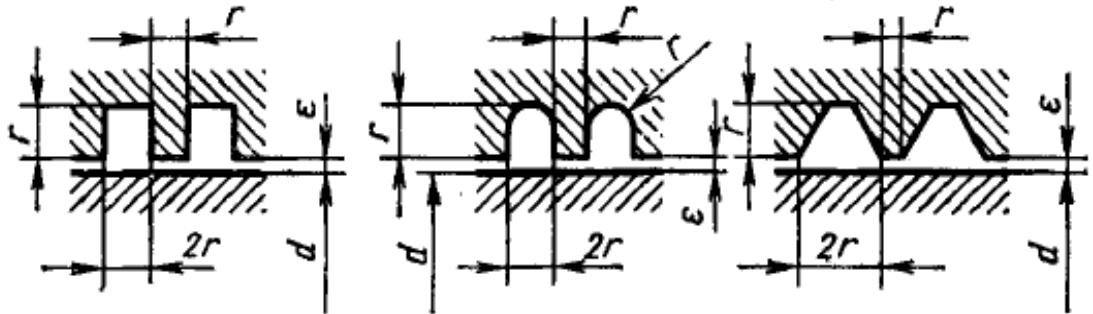
SKF also can assist you in optimizing lubrication settings and intervals and in developing a customized lubrication programme.

SKF offers a complete product portfolio of manual lubrication tools and the industry's most advanced automatic lubrication systems.



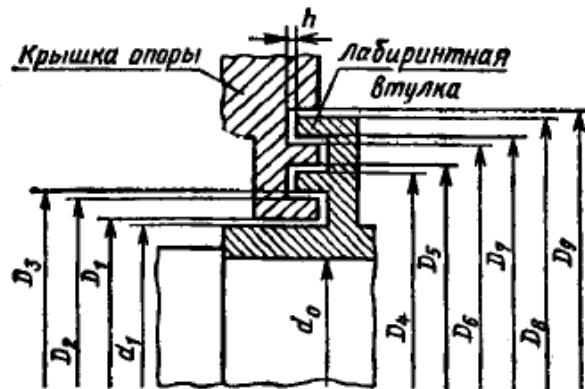


Рекомендовані розміри жирових канавок [9, 10]



Діаметр вала d	Глибина канавки r	Зазор ε
20-65	1	0,3
65-95	1,25	0,4
95-120	1,5	0,5
120-180	2	0,5

Розміри лабіринтних ущільнень, мм [9].



d_0	d_1	h	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	D_6	D_7	D_8	D_9
25	40	$2,5 \pm 1$	40,6	54,4	55	69,4	70	—	—	—	—
30	45		45,6	59,4	60	74,4	75				
35	50		50,6	64,4	65	79,4	80				
40	55		55,6	69,4	70	84,4	85				
45	60		60,8	74,2	75	89,2	90				
50	65		65,8	79,2	80	94,2	95				
55	70		70,8	84,2	85	99,2	100				
60	80		80,8	94,2	95	109,2	110				
65	85	3 ± 1	85,8	99,2	100	114,2	115	129,2	130	144,2	145
70	90		90,8	104,2	105	119,2	120	134,2	135	149,2	150
75	95		95,8	109,2	110	124,2	125	139,2	140	154,2	155
80	100		100,8	114,2	115	129,2	130	144,2	145	159,2	160
90	110		110,8	124,2	125	139,2	140	154,2	155	169,2	170
95	120		121	134	135	149	150	164	165	179	180
100	130		131	144	145	159	160	174	175	189	190
110	140		141	159	160	179	180	199	200	219	220
120	150		151	169	170	189	190	209	210	229	230
130	160		161	179	180	199	200	219	220	239	240
140	170		171	189	190	209	210	229	230	249	250
150	180		181	199	200	219	220	239	240	259	260
160	190		191	209	210	229	230	249	250	269	270
170	200		201	219	220	239	240	259	260	279	280

Примечание. Размеры d_1 , D_2 , D_3 , D_4 и D_5 по $h11$. Размеры D_1 , D_6 , D_7 , D_8 и D_9 — по $H11$. Глубина кольцевых пазов $l = 8$ мм.

Відносна вартість різних видів безконтактних ущільнень

Ущільнення	Рисунок	Відносна вартість
Щілинне аксіальне	2,1, а	1
Щілинне радіальне	2.3	4-6 (в залеж. від довжини щілини)
Прямотічне аксіальне (3 жирові канавки)	2.1, б ,	3
Двоступеневе зигзаговидне лабіринтне	2.4	12
Гвинтоканавкове	2.17	2
Масловідбійник		6

Таблиця Д4.2

Збільшення вартості безконтактних ущільнень
із ростом кількості ступенів [9]

Ущільнення	Відносна вартість
Прямотічне аксіальне лабіринтне при кількості канавок:	
3	1,00
5	1,25
7	1,50
9	1,75
Зигзаговидне аксіальне лабіринтне при кількості робочих зазорів:	
3	1,00
5	1,40
7	1,75
9	2,05
Зигзаговидне радіальне лабіринтне при кількості робочих зазорів:	
2	1,00
4	1,55
6	2,15
8	2,75
10	3,35